

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-220029  
(43)Date of publication of application : 30.08.1996

## (51)Int.Cl.

G01N 23/225  
G01T 1/24  
G01T 7/00  
G21C 17/003

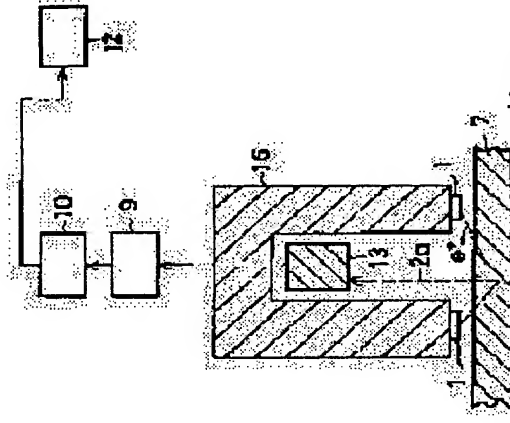
(21)Application number : 07-024014  
(22)Date of filing : 13.02.1995  
(71)Applicant : TOSHIBA CORP  
(72)Inventor : GOTO TETSUO  
UEDA HIROYUKI

## (54) APPARATUS AND METHOD FOR NON -DESTRUCTIVE INSPECTION FOR RADIOACTIVELY CONTAMINATED MATERIAL

## (57)Abstract:

**PURPOSE:** To provide the non-destructive inspection apparatus and the inspection method for radioactively contaminated material, which performs the highly accurate judgment of the deterioration inspection of equipment structural material based on  $\gamma$  rays caused by irradiation or generated by radioactive contamination without destruction with less exposure.

**CONSTITUTION:** With respect to the non-destructive inspection apparatus for radioactively contaminated material, positive electrons generated from a positive- electron radiation source 1 are cast on a specimen 7, and the change in shape of the photoelectron peak of the 0.511-MeV annihilation  $\gamma$  rays generated by the reaction with the electrons in the object under inspection is measured by a detector 13 in the non-destructive inspection apparatus. In this apparatus, a collimator 16 with the screening body, which limits the number of radiation fluxes from the inside of the specimen 7, is provided in front of the Ge detector 13. The positive electron radiation source 1 is provided at the outside of the visual field of the opening part of the collimator 16 with the screening body. The illuminating region of the positive electron radiation source 1 is contained in the visual field of the Ge detector 13.



J1017 U.S. PTO  
10/084425  
02/28/02

LEGAL STATUS

- [Date of request for examination]
- [Date of sending the examiner's decision of rejection]
- [Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
- [Date of final disposal for application]
- [Patent number]
- [Date of registration]
- [Number of appeal against examiner's decision of rejection]
- [Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]
- [Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-220029

(43) 公開日 平成8年(1996)8月30日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 N 23/225			G 0 1 N 23/225	
G 0 1 T 1/24		9216-2G	G 0 1 T 1/24	
7/00		9216-2G	7/00	B
		9216-2G		C
G 2 1 C 17/003			G 2 1 C 17/00	E
審査請求 未請求 請求項の数22 OL (全 24 頁)				

(21) 出願番号 特願平7-24014

(22) 出願日 平成7年(1995)2月13日

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72) 発明者 後藤 哲夫

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 上田 裕之

東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝本社事務所内

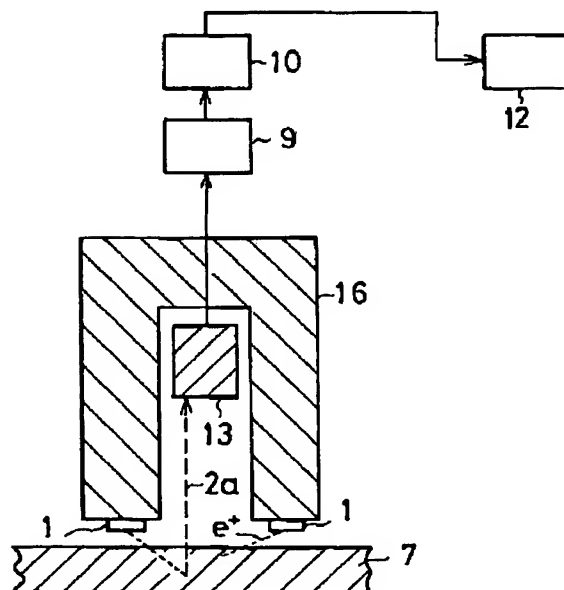
(74) 代理人 弁理士 猪股 祥晃

(54) 【発明の名称】 放射性汚染物質用非破壊検査装置と検査方法

(57) 【要約】

【目的】 機器構造材の劣化検査を照射あるいは放射線汚染により発生する $\gamma$ 線から非破壊で被曝が少なく高精度で判定する放射性汚染物質用非破壊検査装置と検査方法を提供する。

【構成】 請求項1記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電子ピークの形状変化を検出器で測定する非破壊検査装置において、Ge検出器13の前面に被検体7中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータ16を設けると共に、陽電子線源1を遮蔽体付きコリメータ16の開口部視野外に設置し、前記陽電子線源1の照射領域をGe検出器13の視野内に納めるようにしたことを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電子ピークの形状変化をGe検出器で測定する非破壊検査装置において、前記Ge検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けると共に陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野外に設置して、前記陽電子線源の照射領域をGe検出器の視野内に納めるようにしたことを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項2】 陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電子ピークの形状変化をGe検出器で測定する非破壊検査装置において、前記Ge検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して、前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電気的あるいは光信号として取出して前記Ge検出器からの信号とを同時計数することにより被検体内電子と陽電子と間の消滅反応により生じた0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、その光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項3】 陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内電子と陽電子との間の消滅反応で生じた0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に相当する信号を $\gamma$ 線用検出器で測定する非破壊検査装置において、前記 $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して、前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電気的あるいは光信号として取出して前記 $\gamma$ 線用検出器により測定された被検体内電子と陽電子と間の消滅反応により生じた0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に相当する信号との間の時間差から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項4】 前記陽電子線源を前記消滅 $\gamma$ 線用検出器の測定視野外に配置したことを特徴とする請求項1乃至請求項3記載の放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項5】 前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電気的あるいは光信

号として取出す検出装置が、陽電子線源を被検体面の反対面に沈着あるいは埋込んだ薄型シンチレータ板を設けて、前記陽電子線源からの陽電子が被検体に到達する間に当該電子のエネルギーの一部を前記薄型シンチレータ板内で損失させると共にこの損失エネルギーに該当する光信号を直接あるいは光ガイドを介し光電子増倍管に入力することを特徴とする請求項2乃至請求項4記載の放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項6】 前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電気的あるいは光信号として取出す検出装置が、前記陽電子線源を透過型シンチレータ板及びこの透過型シンチレータ板より厚くかつシンチレータ光に対して透明な物質で層状に挟み込んで陽電子のエネルギーの一部を前記透過型シンチレータ板内で損失させると共にこの損失エネルギーに該当する光信号を透過型シンチレータ板から直接的あるいは光ガイドを介して光電子増倍管に入力することを特徴とする請求項2乃至請求項4記載の放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項7】 前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電気的あるいは光信号として取出して前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器からの信号とを同時計数する検査装置において、前記陽電子線源に最大エネルギー0.3MeV以上の陽電子を放出する陽電子線源を用いると共に、前記被検体と透過型検出器の間に80mg/cm<sup>2</sup>以下の $\beta$ 線吸収体を配置することを特徴とする請求項2乃至請求項6記載の放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項8】 前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けてGe検出器または $\gamma$ 線用検出器を水密に配置すると共に水中にある被検体に対峙させた陽電子線源との間をエアカーテンなどを設けて、前記陽電子線源と被検体間に空間を形成することを特徴とする請求項1乃至請求項6記載の放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項9】 前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータ及び陽電子線源を設けると共に、前記被検体と陽電子線源との間に陽電子の最大飛程以上の厚みを有し

3

て前記被検体と同一材質もしくは異なる $\beta$ 線吸収体からなる陽電子線源校正用フィルタを校正用フィルタ駆動機構により挿抜自在に設けたことを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項10】 陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を測定する非破壊検査装置において、前記被検体と陽電子線源との間に挿抜自在に配置した陽電子線源校正用フィルタを校正用フィルタ駆動機構により自動的に挿抜して、陽電子線源校正用フィルタの挿入状態及び引抜き状態のそれぞれにおける被検体測定時の $\gamma$ 線スペクトルを測定して、この信号時間差もしくは0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状の差から被検体の劣化度を判定することを特徴とする請求項9記載の放射性汚染物質用非破壊検査方法。

【請求項11】 前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータ及び陽電子線源を設けると共に前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の近傍に0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に近い $\gamma$ 線エネルギーを放出する校正用線源を校正用線源駆動機構により挿抜自在に設けてさらに前記被検体と陽電子線源との間に $\beta$ 線吸収体を $\beta$ 線吸収体用駆動機構により挿抜自在に設けたことを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項12】 陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を測定する非破壊検査装置において、 $\beta$ 線吸収体用駆動機構により $\beta$ 線吸収体を挿入して陽電子線源を被検体に対し非照射状態とし、校正用線源から放出される当該 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て当該 $\gamma$ 線の光電ピークの形状を求めると共に、校正用線源用駆動機構により校正用線源の非設置状態及び陽電子線源を被検体に対し照射状態で0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、このスペクトルから消滅 $\gamma$ 線の光電ピークの形状を求めて両者の変化率より材質の劣化度を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査方法。

【請求項13】 陽電子線源を直接視野に納めない位置で被検体表面の陽電子照射領域を視野に納めるように配置した第1の $\gamma$ 線用検出器と、陽電子及び $\gamma$ 線をほぼ同時に放出する陽電子線源の前方に遮蔽体付きコリメータを設けて陽電子線源を通り直接被検体を視野に納めない位置に配置した第2の $\gamma$ 線用検出器を備えて、前記第2の $\gamma$ 線用検出器により放出 $\gamma$ 線を測定してこれを開始時間とすると共に第1の $\gamma$ 線用検出器により消滅 $\gamma$ 線を測定しこれを終了時間とし、両者の差から陽電子の寿命を求めることを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項14】 陽電子線源を直接見えない位置に置かれて被検体表面の陽電子照射領域を視野に納めるGe検出器と、陽電子及び $\gamma$ 線をほぼ同時に放出する核種を用

4

いた陽電子線源の前方に遮蔽体付きコリメータを設けて陽電子線源を通り直接被検体を視野に納めない $\gamma$ 線用検出器を備えて、前記 $\gamma$ 線用検出器により放出 $\gamma$ 線を測定してこれを同時計数信号とし、前記Ge検出器により当該同時計数信号と同期させて $\gamma$ 線スペクトルを測定して消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項15】 前記Ge検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて被検体からの0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の照射領域をGe検出器の視野内に納めるような検査装置において、被検体の表層自体がZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む放射性物質により汚染もしくは被検体自体が中性子による放射化によりZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む場合に、放射性汚染物質中から放出される陽電子と被検体内電子と陽電子と間の消滅反応の結果生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、その光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項16】 検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を互いの視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた第1の $\gamma$ 線用検出器と遮蔽体付きコリメータを備えた第2の $\gamma$ 線用検出器を設けた検査装置において、被検体の表層自体がZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む放射性物質により汚染もしくは被検体自体が中性子による放射化によりZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む場合に、それぞれの $\gamma$ 線用検出器でCo-58から陽電子発生と同時に発生する0.810MeV $\gamma$ 線及び被検体内電子と陽電子と間の消滅反応の結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を検出して両者の信号の時間差から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項17】 検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を互いの視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた $\gamma$ 線エネルギー弁別可能な $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器と遮蔽体付きコリメータを備えたGe検出器を設けた検査装置において、被検体の表層自体がZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む放射性物質により汚染もしくは被検体自体が中性子による放射化によりZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む場合に、 $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器からの信号のうちCo-58の0.810MeVのエネルギー領域を含む狭いウィンドウ領域の計数出力信号を前記Ge検出器のエネルギー信号のゲート信号として用いて同時計数させることにより消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項18】 検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を視野に納めるよう配置した遮蔽体付き

5

コリメータを備えた2つの寿命測定用の $\gamma$ 線用検出器を備えて、第1の $\gamma$ 線用検出器で陽電子消滅 $\gamma$ 線を、また第2の $\gamma$ 線用検出器で陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線を測定して両者の時間差から陽電子の寿命測定を行う検査装置において、前記2つの $\gamma$ 線用検出器が $\text{CaF}_2$ シンチレーション検出器であることを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査装置。

【請求項19】 陽電子及び $\gamma$ 線をほぼ同時に放出する陽電子放出核種から放出される陽電子の被検体内で第1の $\gamma$ 線用検出器は陽電子消滅 $\gamma$ 線を測定し、第2の $\gamma$ 線用検出器で陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線を検知して両検出器からの出力信号の高速成分パルスの時間差信号を得ると共に、両検出器から発生する遅延成分の出力信号から陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線及び陽電子消滅 $\gamma$ 線エネルギーに相当する狭いエネルギー領域の波高を有する2つのゲート信号を取得して前記時間差信号にゲートをかけることにより陽電子の寿命を測定することとを特徴とする請求項18記載の放射性汚染物質用非破壊検査方法。

【請求項20】 陽電子の消滅 $\gamma$ 線スペクトルの形状判定において、2種類の標準偏差をもつ $\gamma$ 線ピークの和として消滅 $\gamma$ 線スペクトルを近似し、それぞれの $\gamma$ 線ピークの計数比率により被検体材質の劣化度を判定することとを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査方法。

【請求項21】 中性子を受ける可能性のある被検体に対しGe検出器の $\gamma$ 線スペクトルよりCo-60の光電ピーク計数率を得て幾何学的効率を考慮することにより、被検体中に含まれるCo-60の放射能濃度に換算すると共にこの放射能濃度から被検体の中性子照射積分量を評価して、同時に同 $\gamma$ 線スペクトル上の陽電子消滅に伴う0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状を測定し、Co-60の放射能濃度及び0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状の両者から被検体材質の劣化度を判定することとを特徴とする放射性汚染物質用非破壊検査方法。

【請求項22】 放射性汚染物質である被検体材質の劣化度を判定する際に、予め被検体表面に付着した鉄錆などを物理的除染により除去することとを特徴とする請求項1乃至請求項20記載の放射性汚染物質用非破壊検査方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、原子炉施設で使用されている配管や構造材などの放射能で汚染、あるいは放射化した金属の健全性を確認するために定期点検時などで使用する放射性汚染物質用非破壊検査装置と検査方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来より陽電子を被検体に照射し、その陽電子の寿命や消滅 $\gamma$ 線のエネルギーの広がりなどを測定して、被検体の材質劣化を判定する技術が知られてい

6

る。物質中の陽電子は、減速及び熱化されて殆ど静止状態で電子と反応し、消滅すると共に2本の0.511MeV $\gamma$ 線を放出する。この際に消滅相手の運動エネルギーに依存したドップラー効果の影響を受けるため、消滅 $\gamma$ 線のエネルギーを精密に測定することにより、相手電子の運動エネルギーの情報を得ることが可能となる。

【0003】 通常、相手が殻内電子の場合には、エネルギーの広がり2keV程度まで広がる。一方、自由電子の場合には、エネルギーの広がり前者に比べて無視し得るほど少ない。したがって、Ge検出器のようなエネルギー分解能が十分に高い $\gamma$ 線用検出器により、消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを測定することで両者を弁別することが可能である。

【0004】 被検体が完全結晶の場合に、熱化された陽電子は正電荷であるため、イオン殻から離れた位置、すなわち格子間位置での存在確率がもっとも高い。ところが結晶中に空孔や、その集合体などの欠陥が存在すると、その部分は自由電子が回りからしみだした状態となり、周囲からみた場合に負に帯電した状態となって陽電子は捕獲される。

【0005】 なお、欠陥部は内殻電子は少なく、また自由電子も少ないために消滅までの寿命は長くなる。なお、欠陥の無い場合の陽電子の寿命は各金属に固有で、100から200ピコ秒程度であり、欠陥の存在する被検体では平均して最大でその2倍まで寿命が延びる場合もある。

【0006】 また、殻内電子との反応する確率が低く、前述したようにドップラー効果によるエネルギーの広がりへの影響は少なくなる。したがって、陽電子が生成してから寿命、もしくは消滅 $\gamma$ 線のエネルギーの広がりを測定すれば、欠陥の濃度の測定が可能となる。

【0007】 図22のブロック図は、陽電子の被検体内の寿命測定法による検査装置を示すもので、陽電子線源1としてはNa-22などの陽電子及び $\gamma$ 線を同時に発生する核種が用いられる。この陽電子線源1から発生する $\gamma$ 線2bは、 $\gamma$ 線用検出器3bにより検出されて、タイミングディスクリ4b及びディレイ5を経て時間波高変換器6のスタート信号に取り込まれる。

【0008】 また、被検体7内の電子と陽電子との反応により発生する0.511MeV $\gamma$ 線2aは、別の $\gamma$ 線用検出器3aにより検出され、タイミングディスクリ4aを経て前記時間波高変換器6のスタート信号に取り込まれ、両者の時間差に相当する出力波高を持つパルスに変換されて線形ゲート8の入力となる。

【0009】 一方、 $\gamma$ 線用検出器3a、3bからのそれぞれの信号は、前置増幅器9a、9bと、線形増幅器10a、10b、及びシングルチャネル波高弁別器11a、11bを経て、線形ゲート8の同時計数入力となる。最後に線形ゲート8の出力は、マルチチャネルアナライザ12によりデジタル化され、時間スペクトルとして蓄積されて



7

平均的寿命が求められる。

【0010】図23のブロック図は、 $\gamma$ 線エネルギースペクトル測定法による検査装置を示したもので、陽電子線源1は被検体7間に挟んで設けられ、これに近接して配置したGe検出器13により検出した消滅 $\gamma$ 線は、前置増幅器9及び線形増幅器10と、マルチチャンネルアナライザ12により、0.511MeV消滅 $\gamma$ 線が $\gamma$ 線エネルギースペクトルの形で計測される。

【0011】0.511MeV $\gamma$ 線に該当する光電ピークは、図24の分布特性図で(a)に示すように、点線14のエネルギー広がり幅の広い殻内電子との消滅成分、及び実線15のエネルギー広がり幅の狭い自由電子との消滅成分の和で表し、図24(b)で示されるような中央部面積Aと、周辺部面積( $B_1 + B_2$ )との比である、Sパラメータの変化率が欠陥濃度の目安となり、これは次の式(1)で示される。

$$【0012】S = A / (B_1 + B_2) \cdots (1)$$

【0013】一例として図25の焼鈍し特性図に、423Kで $1.5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ の線束で中性子を照射した、Mn-Ni-Mo合金(A533-B)の焼鈍し後のSパラメータの変化率を示す。温度の異なる各条件で1時間焼鈍しを行い、473K以下では殆どの焼鈍しによる欠陥の除去ができず、それ以上では欠陥の除去が進み、消滅 $\gamma$ 線スペクトルにおけるエネルギー広がり幅の広い殻内電子との消滅成分( $B_1 + B_2$ )の増加に伴い、Sパラメータが減少している。

【0014】また、陽電子の寿命についても同様の変化となっている。この変化は中性子照射による材質硬化減少が、図26の焼鈍しと硬化度特性図に示すように、焼鈍しの結果から無くなる現象と対応しており、Sパラメータもしくは陽電子の寿命測定を行うことで、中性子照射による材質の変化が測定し得ることを示している。なお、陽電子線源1としては上記Na-22の他にGe-68、Co-55などの使用が可能である。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】以上の従来技術は、小型の試験体に対する実験室における測定をもとにしたものであり、たとえば、原子炉施設での汚染機器などの測定を行おうとする場合には、被検体7自体が放射能に汚染していたり、あるいは中性子照射による放射化により放射能を帯びている可能性がある。また、周辺汚染機器などから放出される $\gamma$ 線の影響下で測定を行う可能性があり、次のような課題があった。

【0016】(1) 周辺汚染機器による $\gamma$ 線の影響を避けて、被検体からの $\gamma$ 線による検出器の飽和を避けるために、検出器前段に小径の開口部を有する遮蔽体付きコリメータを設置する方法が用いられる。

【0017】このような方法では上記図22あるいは図23に示すように、陽電子線源1を検出器3a、3b、13の視野に納めるような配置では、陽電子が検出器近傍の遮

8

蔽体付きコリメータの表面で消滅する結果、これにより生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2bと、本来の被検体7で消滅した結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aとが重なって、本来の検出器からの情報の信号/ノイズ弁別比(以下S/N比と呼ぶ)が悪化する。

【0018】(2) エネルギー計測を行う方法においては、放射能汚染の主要構成核種であるCo-60などの比較的高いエネルギーを放出する放射性核種から発生する $\gamma$ 線の散乱線や、検出器内部での散乱の影響により、図27の光電ピーク特性図に示すように0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク下部の計数率が増加する。

【0019】この結果、外部からの $\gamma$ 線の影響のない場合に比べて、図24(b)に示した光電ピークの中央部面積A、及び周辺部面積 $B_1 + B_2$ の算出に当たっての誤差が増加して、正確な評価ができなくなる。この対策としては、陽電子線源1の数量を増加させるか、あるいは測定時間を長くとの必要があり、取扱い上の制約や測定員に対する被曝が増加する問題が避けられない。

【0020】(3) 陽電子の寿命を計測する手法については、100ナノ秒オーダーの極めて短い時間の計測が要求されるため、NaIシンチレーション検出器などのパルス応答時間の遅い検出器(シンチレーション減衰時間230ナノ秒)については使用することができない。

【0021】このために、従来はパルス応答時間の極めて早い検出器(シンチレーション減衰時間2ナノ秒程度)であるプラスチックシンチレーション検出器が用いられてきた。しかしながら、このプラスチックシンチレーション検出器の場合は、密度が低く小型検出器を使用した場合には検出効率を高く得られず、測定時間を長くする必要がある。

【0022】また、エネルギーの弁別性に劣ることから、被検体7あるいは周辺汚染機器などから発生する $\gamma$ 線と、陽電子の放出とほぼ同時に発生する $\gamma$ 線、及び消滅 $\gamma$ 線とのエネルギーの弁別ができない。このために、被検体7などが放射能を帯びているもの、あるいは周辺の $\gamma$ 線による影響が強い場合は、こうしたバックグラウンドに伴う計数率が増加すると、 $\gamma$ 線の偶発同時計数が大きくなり、時間差の測定精度が悪化する困難が生じる恐れがあった。

【0023】(4) 放射性物質で汚染された被検体7を測定する場合には、測定員の被曝を避けることや、測定員のアクセスが不可能な位置に被検体7が設置されている場合も想定されることから、遠隔での操作が必要になる。このような場合に、湿度や温度などにより回路条件が影響を受け、また、被検体7の放射エネルギーによって、高計数率による信号のバリエーションの影響を補正することが必要になる。

【0024】特に後者については、検出器に入射する $\gamma$ 線計数率は被検体7の放射エネルギーで変動し、高計数率になるほど光電ピークの幅(エネルギー分解能)が増加する計

数率の形状、あるいは寿命測定の時分シフトの影響が大きくなる。またエネルギー測定法では、測定結果の判定において光電子ピークにおけるエネルギー分解能の増減変動を測定するものであり、エネルギー分解能の変動が、環境要因あるいは計数率要因によるものか、被検体7の材質要因によるものかを人手を要せずに、かつ現場で確認し得る技術が必要とするという問題があった。

【0025】(5) 測定対象物の放射線量が極めて大きい場合には、測定対象物の耐放射線性や測定員の被曝防止の観点から、被検体周囲に水を張った状態で測定を行う場合も想定される。しかしこのような場合には、陽電子の水中での飛程が短いため、陽電子線源1と被検体7を密着した状態で測定する必要がある。

【0026】この場合には陽電子線源1の放射能汚染、あるいは被検体表面に付着した鉄錆などの影響で、陽電子線源1から放出される陽電子にエネルギーの損失と吸収が生じ、消滅 $\gamma$ 線の見かけ上の効率が低下する可能性があり、極端な場合には陽電子線源1を破損させる恐れがあった。

【0027】(6) 陽電子線源1を用いた方法では、被検体7の放射線量が高い場合には、十分なS/N比を確保するために、陽電子線源1の放射線量を増加する必要がある、その程度には法律上の制約や被曝防止上の制約が避けられないという不具合があった。

【0028】本発明の目的とするところは、機器構造材の劣化検査を照射あるいは放射線汚染により発生する $\gamma$ 線から非破壊で被曝が少なく高精度で判定する放射性汚染物質用非破壊検査装置と検査方法を提供することにある。

【0029】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため請求項1記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電子ピークの形状変化をGe検出器で測定する非破壊検査装置において、前記Ge検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けると共に陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内に設置して、前記陽電子線源の照射領域をGe検出器の視野内に納めるようにしたことを特徴とする。

【0030】請求項2記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電子ピークの形状変化をGe検出器で測定する非破壊検査装置において、前記Ge検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して、前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの

一部を前記透過型検出器内で損失させて電氣的あるいは光信号として取出して前記Ge検出器からの信号とを同時計数することにより被検体内電子と陽電子と間の消滅反応により生じた0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、その光電子ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする。

【0031】請求項3記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内電子と陽電子との間の消滅反応で生じた0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に相当する信号を $\gamma$ 線用検出器で測定する非破壊検査装置において、前記 $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して、前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電氣的あるいは光信号として取出して前記 $\gamma$ 線用検出器により測定された被検体内電子と陽電子と間の消滅反応により生じた0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に相当する信号との間の時間差から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする。

【0032】請求項4記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記陽電子線源を前記消滅 $\gamma$ 線用検出器の測定視野外に配置したことを特徴とする。

【0033】請求項5記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電氣的あるいは光信号として取出す検出装置が、陽電子線源を被検体面の反対面に沈着あるいは埋込んだ薄型シンチレータ板を設けて、前記陽電子線源からの陽電子が被検体に到達する間に当該電子のエネルギーの一部を前記薄型シンチレータ板内で損失させると共にこの損失エネルギーに該当する光信号を直接あるいは光ガイドを介し光電子増倍管に入力することを特徴とする。

【0034】請求項6記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器または $\gamma$ 線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電氣的あるいは光信号として取出す検出装置が、前記陽電子線源を透過型シンチレータ板及びこの透過型シンチレータ板より厚くかつシンチレータ光に対して透明な物質で層状に挟



み込んで陽電子のエネルギーの一部を前記透過型シンチレータ板内で損失させると共にこの損失エネルギーに該当する光信号を透過型シンチレータ板から直接的あるいは光ガイドを介して光電子増倍管に入力することを特徴とする。

【0035】請求項7記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器またはγ線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて前記陽電子線源を遮蔽体付きコリメータの開口部視野内で被検体及び被検体に近接して設置すると共にこの陽電子線源と被検体の間に透過型検出器を設置して前記被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を前記透過型検出器内で損失させて電気的あるいは光信号として取出して前記Ge検出器またはγ線用検出器からの信号とを同時計数する検査装置において、前記陽電子線源に最大エネルギー0.3MeV以上の陽電子を放出する陽電子線源を用いると共に、前記被検体と透過型検出器の間に80mg/cm<sup>2</sup>以下のβ線吸収体を配置することを特徴とする。

【0036】請求項8記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器またはγ線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けてGe検出器またはγ線用検出器を水密に配置すると共に水中にある被検体に対峙させた陽電子線源との間をエアカーテンなどを設けて、前記陽電子線源と被検体間に空間を形成することを特徴とする。

【0037】請求項9記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器またはγ線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータ及び陽電子線源を設けると共に、前記被検体と陽電子線源との間に陽電子の最大飛程以上の厚みを有して前記被検体と同一材質もしくは異なるβ線吸収体からなる陽電子線源校正用フィルタを校正用フィルタ駆動機構により挿抜自在に設けたことを特徴とする。

【0038】請求項10記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査方法は、陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅γ線を測定する非破壊検査装置において、前記被検体と陽電子線源との間に挿抜自在に配置した陽電子線源校正用フィルタを校正用フィルタ駆動機構により自動的に挿抜して、陽電子線源校正用フィルタの挿入状態及び引抜き状態のそれぞれにおける被検体測定時のγ線スペクトルを測定して、この信号時間差もしくは0.511MeV消滅γ線の光電ピーク形状の差から被検体の劣化度を判定することを特徴とする。

【0039】請求項11記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器またはγ線用検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータ及び陽電子線源を設けると共に前記Ge

検出器またはγ線用検出器の近傍に0.511MeV消滅γ線に近いγ線エネルギーを放出する校正用線源を校正用線源駆動機構により挿抜自在に設けてさらに前記被検体と陽電子線源との間にβ線吸収体をβ線吸収体用駆動機構により挿抜自在に設けたことを特徴とする。

【0040】請求項12記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査方法は、陽電子線源から発生する陽電子を被検体に照射して被検体内の電子との反応で発生する0.511MeV消滅γ線を測定する非破壊検査装置において、β線吸収体用駆動機構によりβ線吸収体を挿入して陽電子線源を被検体に対し非照射状態とし、校正用線源から放出される当該γ線のエネルギースペクトルを得て当該γ線の光電ピークの形状を求めると共に、校正用線源用駆動機構により校正用線源の非設置状態及び陽電子線源を被検体に対し照射状態で0.511MeV消滅γ線のエネルギースペクトルを得て、このスペクトルから消滅γ線の光電ピークの形状を求めて両者の変化率より材質の劣化度を判定することを特徴とする。

【0041】請求項13記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、陽電子線源を直接視野に納めない位置で被検体表面の陽電子照射領域を視野に納めるように配置した第1のγ線用検出器と、陽電子及びγ線をほぼ同時に放出する陽電子線源の前方に遮蔽体付きコリメータを設けて陽電子線源を通り直接被検体を視野に納めない位置に配置した第2のγ線用検出器を備えて、前記第2のγ線用検出器により放出γ線を測定してこれを開始時間とすると共に第1のγ線用検出器により消滅γ線を測定しこれを終了時間とし、両者の差から陽電子の寿命を求めることを特徴とする。

【0042】請求項14記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、陽電子線源を直接見えない位置に置かれて被検体表面の陽電子照射領域を視野に納めるGe検出器と、陽電子及びγ線をほぼ同時に放出する核種を用いた陽電子線源の前方に遮蔽体付きコリメータを設けて陽電子線源を通り直接被検体を視野に納めないγ線用検出器を備えて、前記γ線用検出器により放出γ線を測定してこれを同時計数信号とし、前記Ge検出器により当該同時計数信号と同期させてγ線スペクトルを測定して消滅γ線の光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする。

【0043】請求項15記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、前記Ge検出器の前面に被検体中からの放射線束数を制限する遮蔽体付きコリメータを設けて被検体からの0.511MeV消滅γ線の照射領域をGe検出器の視野内に納めるような検査装置において、被検体の表層自体がZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む放射性物質により汚染もしくは被検体自体が中性子による放射化によりZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む場合に、放射性汚染物質中から放出される陽電子と被検体内電子と陽電子と間の消滅反応の結果生じる

0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、その光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする。

【0044】請求項16記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を互いの視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた第1の $\gamma$ 線用検出器と遮蔽体付きコリメータを備えた第2の $\gamma$ 線用検出器を設けた検査装置において、被検体の表層自体がZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む放射性物質により汚染もしくは被検体自体が中性子による放射化によりZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む場合に、それぞれの $\gamma$ 線用検出器でCo-58から陽電子発生と同時に発生する0.810MeV $\gamma$ 線及び被検体内電子と陽電子と間の消滅反応の結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を検出して両者の信号の時間差から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする。

【0045】請求項17記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を互いの視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた $\gamma$ 線エネルギー弁別可能な $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器と遮蔽体付きコリメータを備えたGe検出器を設けた検査装置において、被検体の表層自体がZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む放射性物質により汚染もしくは被検体自体が中性子による放射化によりZn-65、Co-58などの陽電子放出核種を含む場合に、 $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器からの信号のうちでCo-58の0.810MeVのエネルギー領域を含む狭いウィンドウ領域の計数出力信号を前記Ge検出器のエネルギー信号のゲート信号として用いて同時計数させることにより消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定することを特徴とする。

【0046】請求項18記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査装置は、検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた2つの寿命測定用の $\gamma$ 線用検出器を備えて、第1の $\gamma$ 線用検出器で陽電子消滅 $\gamma$ 線を、また第2の $\gamma$ 線用検出器で陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線を測定して両者の時間差から陽電子の寿命測定を行う検査装置において、前記2つの $\gamma$ 線用検出器がCaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器であることを特徴とする。

【0047】請求項19記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査方法は、陽電子及び $\gamma$ 線をほぼ同時に放出する陽電子放出核種から放出される陽電子の被検体内で第1の $\gamma$ 線用検出器は陽電子消滅 $\gamma$ 線を測定し、第2の $\gamma$ 線用検出器で陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線を検知して両検出器からの出力信号の高速成分パルスの時間差信号を得ると共に、両検出器から発生する遅延成分の出力信号から陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線及び陽電子

消滅 $\gamma$ 線エネルギーに相当する狭いエネルギー領域の波高を有する2つのゲート信号を取得して前記時間差信号にゲートをかけることにより陽電子の寿命を測定することを特徴とする。

【0048】請求項20記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査方法は、陽電子の消滅 $\gamma$ 線スペクトルの形状判定において、2種類の標準偏差をもつ $\gamma$ 線ピークの和として消滅 $\gamma$ 線スペクトルを近似し、それぞれの $\gamma$ 線ピークの計数比率により被検体材質の劣化度を判定することを特徴とする。

【0049】請求項21記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査方法は、中性子を受ける可能性のある被検体に対しGe検出器の $\gamma$ 線スペクトルよりCo-60の光電ピーク計数率を得て幾何学的効率を考慮することにより、被検体中に含まれるCo-60の放射能濃度に換算すると共にこの放射能濃度から被検体の中性子照射積分量を評価して、同時に同 $\gamma$ 線スペクトル上の陽電子消滅に伴う0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状を測定し、Co-60の放射能濃度及び0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状の両者から被検体材質の劣化度を判定することを特徴とする。

【0050】請求項22記載の発明に係る放射性汚染物質用非破壊検査方法は、放射性汚染物質である被検体材質の劣化度を判定する際に、予め被検体表面に付着した鉄錆などを物理的除染により除去することを特徴とする。

【0051】

【作用】請求項1記載の発明は、陽電子線源により被検体から発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線はGe検出器に入力されるが、遮蔽付きコリメータ中で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線は、遮蔽体に吸収されてGe検出器13には到達しない。したがって、遮蔽付きコリメータ中で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線はGe検出器の入力と重ならず高いS/N比が得られる。

【0052】また、Ge検出器からの信号は、前置増幅器及び線形増幅器を経てマルチチャネルアナライザによりディジタル化され、Sパラメータに代表される消滅 $\gamma$ 線の光電ピークの形状パラメータが計算される。

【0053】請求項2記載の発明は、陽電子線源から出た陽電子は、エネルギーの一部を透過型検出器で損失されて信号として取り出され、また、一部のエネルギーを損失した陽電子は、被検体の電子と結合して0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を放出し、Ge検出器にて電気信号に変換される。

【0054】Ge検出器からの信号で透過型検出器と同時に入射したもののみ、マルチチャネルアナライザの入力となり、 $\gamma$ 線スペクトルの形で蓄積され、このスペクトルは、陽電子の透過に伴う信号と同時計数させたもので偶発的な事象を除き、陽電子の被検体7内での消滅に伴う信号のみの寄与分しか含まれていない。また、 $\gamma$ 線スペクトルは、光電ピークの中心部と、周辺部の計数率比であるSパラメータを算出して材質劣化指標とされる。

【0055】請求項3記載の発明は、電子線源より被検体に到達する陽電子のエネルギーの一部を透過型検出器内で損失させると共に、この信号と $\gamma$ 線用検出器により測定された、被検体内電子と陽電子と間の消滅反応の結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に相当する信号との間の時間差から、被検体の材質劣化を判定する。

【0056】請求項4記載の発明は、Ge検出器と陽電子線源及び透過型検出器は、別の遮蔽体付きコリメータ内に設置されて互の視野には入らない、したがって、陽電子が遮蔽体や陽電子線源の材質自体との反応で生ずる消滅 $\gamma$ 線、さらに陽電子線源から発生する $\gamma$ 線の妨害が無いため、Ge検出器による被検体から発生した消滅 $\gamma$ 線の測定に際してS/N比が向上する。

【0057】請求項5記載の発明は、陽電子が被検体に到達する間に、陽電子のエネルギーの一部はシンチレータ薄板内で損失し、同損失エネルギーに該当する光信号がシンチレータ薄板からライトガイドを通じ、あるいは直接的光電子増倍管に入力して測定される。

【0058】請求項6記載の発明は、陽電子が被検体に到達する間に、陽電子のエネルギーの一部はシンチレータ薄板内で損失し、同損失エネルギーに該当する光信号が後方ライドガイドで集光されて効率良くライドガイドを通じ、あるいは直接的に光電子増倍管にて測定される。

【0059】請求項7記載の発明は、陽電子線源に最大エネルギー0.3MeV以上の陽電子を放出する陽電子線源を用いると共に、被検体と透過型検出器の間に80mg/cm<sup>2</sup>以下の $\beta$ 線吸収体を配置しているため、被検体の表面汚染によるCo-60などからの $\beta$ 線は、 $\beta$ 線吸収体により吸収されて透過型検出器に影響を与えず、また陽電子線源からの陽電子は支障なく被検体へ到達する。

【0060】請求項8記載の発明は、陽電子線源を配置した遮蔽体付きコリメータは、空洞形成用覆いを介して水中にある被検体と対峙させ、エアカーテンなどにより測定のための空間を確保する。請求項9記載の発明は、陽電子線源を備えた検出器と被検体の間に設けた陽電子線源校正用フィルタを校正用フィルタ駆動装置により、設置状態あるいは非設置状態に切替えて、それぞれにおける $\gamma$ 線の測定を行う。

【0061】請求項10記載の発明は、陽電子線源校正用フィルタを自動的に挿抜して、フィルタの挿入状態及び引抜き状態のそれぞれにおける被検体測定時の $\gamma$ 線スペクトルを測定し、この信号時間差もしくは0.511MeV消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状の差から被検体の劣化度を判定する。請求項11記載の発明は、陽電子線源と被検体との間に $\beta$ 線吸収体を $\beta$ 線吸収体用駆動機構により挿抜すると共に、検出器の近傍に設けた校正用線源を校正用線源駆動機構により検出器に対して照射、非照射させる。

【0062】請求項12記載の発明は、陽電子線源と被検体との間に $\beta$ 線吸収体を挿入して陽電子線源を被検体に対し非照射状態とし、校正用線源から放出される当該 $\gamma$

線のエネルギースペクトルを得て当該 $\gamma$ 線の光電ピークの形状を求めると共に、校正用線源の非設置状態及び陽電子線源を被検体に対し照射状態で0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、このスペクトルから消滅 $\gamma$ 線の光電ピークの形状あるいは陽電子寿命を求めて両者の変化率より材質の劣化度を判定する。

【0063】請求項13記載の発明は、被検体を視野に納め陽電子線源を視野に納めない第1の $\gamma$ 線用検出器により消滅 $\gamma$ 線を測定し、被検体を視野に入れずに陽電子線源を視野に納める第2の $\gamma$ 線用検出器により放出 $\gamma$ 線を測定して、これを開始時間とすると共に前記第1の $\gamma$ 線用検出器による消滅 $\gamma$ 線の測定を終了時間として、両者の差から陽電子の寿命を求める。

【0064】請求項14記載の発明は、直接被検体を視野に納めない $\gamma$ 線用検出器で放出 $\gamma$ 線を測定してこれを同時計数信号とし、陽電子線源を直接見えない位置に置かれて被検体表面の陽電子照射領域を視野に納めるGe検出器により当該同時計数信号と同期させて $\gamma$ 線スペクトルを測定して、消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定する。

【0065】請求項15記載の発明は、遮蔽付きコリメータ内に設置した検出器により、被検体自体から放出される陽電子と被検体内電子と陽電子と間の消滅反応の結果生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て、その光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定する。

【0066】請求項16記載の発明は、被検体自体から放出される $\gamma$ 線を検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を互いの視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた第1の $\gamma$ 線用検出器で0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を検出すると共に、第2の $\gamma$ 線用検出器で0.810MeV $\gamma$ 線をそれぞれ測定して、両者の信号の時間差から被検体の材質劣化を判定する。

【0067】請求項17記載の発明は、被検体自体から放出される $\gamma$ 線を検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を互いの視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた $\gamma$ 線用検出器で測定する。また、 $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器からの信号のうちでCo-58の0.810MeVのエネルギー領域を含む狭いウインドウ領域の計数出力信号をGe検出器のエネルギー信号のゲート信号として用いて、同時計数させることにより消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得て消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状から被検体の材質劣化を判定する。

【0068】請求項18記載の発明は、陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線を測定して両者の時間差から陽電子の寿命測定を行う、互いに検出器相互の視野を納めることなく被検体の同一位置を視野に納めるよう配置した遮蔽体付きコリメータを備えた消滅 $\gamma$ 線を測定する第1の $\gamma$ 線用検出器、及び $\gamma$ 線を測定する第2の $\gamma$ 線用検出器を、CaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器としたので、ゲート信号についてエネルギー的な弁別が可能となり、陽電子の寿

命測定精度を高く得られる。

【0069】請求項19記載の発明は、被検体自体から放出される $\gamma$ 線を第1の $\gamma$ 線用検出器で消滅 $\gamma$ 線を、また第2の $\gamma$ 線用検出器で $\gamma$ 線を検知して、両検出器からの出力信号の高速成分パルスの時間差信号を得ると共に、両検出器から発生する遅延成分の出力信号から陽電子放出時に同時発生する $\gamma$ 線及び陽電子消滅 $\gamma$ 線エネルギーに相当する狭いエネルギー領域の波高を有する2つのゲート信号を取得して前記時間差信号にゲートをかけることにより陽電子の寿命を測定する。

【0070】請求項20記載の発明は、陽電子の消滅 $\gamma$ 線スペクトルの形状判定において、2種類の標準偏差をもつ $\gamma$ 線ピークの和として消滅 $\gamma$ 線スペクトルを近似し、それぞれの $\gamma$ 線ピークの計数比率により被検体材質の劣化度を判定する。

【0071】請求項21記載の発明は、中性子を受ける可能性のある被検体に対しGe検出器の $\gamma$ 線スペクトルよりCo-60の光電ピーク計数率を得て幾何学的効率を考慮するし、被検体中のCo-60の放射能濃度に換算すると共に、この放射能濃度から被検体の中性子照射積分量を評価して、同時に同 $\gamma$ 線スペクトル上の陽電子消滅に伴う0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状を測定し、Co-60の放射能濃度及び0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状の両者から被検体材質の劣化度を判定する。

【0072】請求項22記載の発明は、放射性汚染物質である被検体材質の検査に際して、クラッドにより照射した陽電子が消滅されることなく正確な材質特性が得られるように、予め被検体表面に付着した鉄錆などを物理的除染により除去する。

【0073】

【実施例】本発明においては上記の課題(1)に対しては、陽電子線源1を検出器の前面に置かれた遮蔽体付きコリメータにより被検体7に面して配置すると共に、陽電子線源1が検出器から直接見られない位置に設定する。これにより、検出器に入射する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aは、被検体7中で発生したものに限定され、遮蔽体などによる消滅 $\gamma$ 線2bは遮蔽体自体に吸収されて検出器には到達しない。

【0074】また、上記の課題(2)に対しては、別途陽電子の発生時の信号を取り出し、Ge検出器13による $\gamma$ 線スペクトル解析時に、同信号を同時計数信号として入力することにより達成される。この適用可能な方式としては、同時計数によるバックグラウンド寄与の低減法、及び消滅 $\gamma$ 線光電ピークの形状識別法の改善の2種類の方法に大別される。

【0075】まず、同時計数によるバックグラウンド寄与の低減法としては、◎

(a) 陽電子線源1としてNa-22、Co-58などの陽電子放出時に $\gamma$ 線を放出する核種を用い、別途、補助 $\gamma$ 線用検出器により陽電子発生時にほぼ同時に発生する $\gamma$ 線を

エネルギー的に選別計数して、同時計数入力としてGe検出器13により測定と同時計数する方法を採る。

【0076】この場合にはCo-60などの周辺機器、あるいは被検体7中から放出される $\gamma$ 線については偶発同時計数を除き、時間的及びエネルギー的に選別されて、陽電子消滅 $\gamma$ 線2aのみが選択的に計数される。なお、本方法は2つの $\gamma$ 線用検出器による同時測定が必要で、全体としての効率が低いことから測定時間の制約の少ない場合に有効である。

10 【0077】(b) 陽電子線源1と被検体7の間に透過型検出器を挟設し、陽電子の透過型検出器内でのエネルギー損失に相当する信号を得て、これを後方に置かれた検出器の $\gamma$ 線エネルギー信号と同時計数させるものである。本方法は陽電子線源1としての核種的な制約がなく、陽電子線源1そのものからの $\gamma$ 線による被曝など取り扱い上の制約も少ない。

【0078】また、周辺機器あるいは被検体7中から放出される $\gamma$ 線による妨害については、偶発同時計数を避けるために透過型検出器をできる限り薄くすることにより無視できるものとなる。さらに、 $\beta$ 線の透過に伴う信号を用いるため、同時計数出力としての計数効率をほぼ100%近くまで確保されて、測定系全体の効率を前記(a)の方法に比べて高くできる。

【0079】(c) 逆同時計数によるバックグラウンド寄与の低減法としては、上記図27の光電ピーク特性図に示すように、Ge検出器における $\gamma$ 線スペクトル上のいわゆるコンプトン散乱部は、Ge検出器内でコンプトン散乱により一部のエネルギーを失い、散乱を受けた $\gamma$ 線が検出器外に逃げることにより生じるものである。

30 【0080】このような成分を減らすためには、Ge検出器の回りを大型の遮蔽体で被検体7からの0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aの入射方向を除いて覆い、Ge検出器に対して逆同時計数を行うことにより低減することができる。すなわち、Ge検出器内でコンプトン散乱して一部のエネルギーを失い検出器外へ逃げた成分については、遮蔽体内でコンプトン散乱、あるいは光電子吸収反応によりエネルギーを失う可能性が高い。

【0081】したがって、このような事象においては、遮蔽体からの信号とGe検出器の信号との逆同時計数を行うことにより、消滅 $\gamma$ 線のエネルギー領域のコンプトン散乱成分を減少させることが可能である。ただし本方法は被検体7が大型化することから、被検体内部での散乱線の寄与が大きい場合には余り有効でない。

【0082】(d) 消滅 $\gamma$ 線光電ピークの形状識別法の改善で、消滅 $\gamma$ 線のエネルギー計測を行う方法において、またエネルギー測定法に対してGe検出器で取得される $\gamma$ 線スペクトルデータについて、次に示す手法で解析を行うことにより大幅なS/N比の改善が可能である。すなわち、消滅 $\gamma$ 線の光電ピークを次の式(2)に示す2つのガウス関数の和、及び平坦なコンプトン散乱部の和とし

て近似する。

【0083】

\*【数1】

\*

$$n_i = \sum_{i=1}^2 \left\{ A_i \times \frac{1}{\sqrt{2\sigma_i^2}} \times e \times P \left[ - (j - j_{ave})^2 / (2\sigma_i^2) \right] + N_{const} \right\} \quad (2)$$

【0084】ここで $n_i$ は $j$ 番目のチャンネルにおける計数、 $A_1$ 及び $A_2$ は定数、 $\sigma_1$ 及び $\sigma_2$ は欠陥部と非欠陥部からのそれぞれの消滅 $\gamma$ 線のエネルギー幅を標準偏差(単位:チャンネル)で示したもので、 $j_{ave}$ は光電ピークの平均チャンネルである。この式(2)の未知数は $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 及び $n_{i=1,2}$ であり、最小自乗法によって求められる。判定の指標パラメータとしては、 $A_1/A_2$ が上記従来の説明で述べた式(1)に定義されるSパラメータの代わりに用いられる。

【0085】従来の消滅 $\gamma$ 線光電ピーク解析法では、ピークの裾部の影響がSパラメータ評価上大きな誤差要因となっていたが、本方法では中心部の形状データと中央部のデータが等価な重みで計算に取り入れられるため、従来のSパラメータに比べてバックグラウンドによる統計的変動を受けることの少ない評価法となる。

【0086】(e)上記課題の(3)に対して第1の解決方法は、Na-22を陽電子線源1として用い、陽電子線源1を視野に納める $\gamma$ 線用検出器、及び被検体7の陽電子照射部を視野に納める $\gamma$ 線用検出器の双方に対して、BF<sub>2</sub>シンチレーション検出器を採用して、次に示す手段により時間測定にエネルギー的な弁別を取り入れることにより $\gamma$ 線バックグラウンドの影響を除去する。

【0087】なお、BF<sub>2</sub>シンチレーション検出器は、シンチレーション成分における高速成分(0.6ナノ秒)、遅延成分(630ナノ秒)の両者を含み、後者については入射エネルギーに比例するエネルギー弁別性を有している。

【0088】したがって、検出器における高速成分の信号時間差信号から陽電子の寿命を測定し、遅延成分から陽電子放出に付随する $\gamma$ 線エネルギー信号、及び消滅 $\gamma$ 線エネルギー信号の双方を識別して、3者の同時計数したもののみを寿命情報として選別すれば、測定時に $\gamma$ 線バックグラウンドの寄与の大きい場合でも良好な寿命測定性能が得られる。

【0089】(f)陽電子線源1と被検体7間に透過型検出器を配設し、時間測定法におけるスタート信号とする方法が第2の解決方法である。これによれば、透過型検出器を薄くすることにより $\gamma$ 線バックグラウンドの影響を少なくでき、また、プラスチックシンチレーション検出器の使用が可能のため、高速な時間信号が得られる。さらに、従来の $\gamma$ 線の計数に伴う寿命時間測定法に比べて、上記課題(2)に対する(b)に述べたと同様な理由で、計測信号処理系の検出効率を高めることが可能である。

【0090】(g)上記課題の(4)に対しては、エネル

ギ計測法と寿命計測法がある。まずエネルギー計測法については、計数率の変動などによる消滅 $\gamma$ 線光電ピークに対するエネルギー分解能の変動については、消滅 $\gamma$ 線(0.511MeV)とエネルギー的に近い核種によるスペクトル形状測定を行い、被検体測定時の消滅 $\gamma$ 線のスペクトル形状との差から判定を行う。

【0091】(h)次の寿命計測法については、被検体測定時に検出器の視野と陽電子線源の照射部との交差部に被検体対象と同一あるいは別の標準試料を置き、被検体測定時との寿命差から材質劣化の判定を行うものである。上記課題の(5)に対しては、水中にて陽電子線源1と被検体7間に空洞を形成する方法が有効である。この空洞形成法としては、被検体7及び陽電子線源1をエアカテン、あるいは物理的空洞で覆い内部に気体を送る。

【0092】上記課題の(6)に対しては、被検体7の汚染状況によって被検体7中の放射能汚染、あるいは放射化した放射能中に含まれる陽電子放出核種を用いる方法が適用可能である。原子炉中で放射化によって生成する放射性物質のうちで、比較的半減期が長いものにはCr-51、Mn-54、Co-60、Fe-55、Co-58、Zn-65、Ni-59などがある。ただし、運転時間のある程度経過した後では、Co-60が主要な核種となる。

【0093】陽電子を放出する核種としては、このうちにCo-58、Zn-65があり、Co-58は半減期71.3日で、最大エネルギー0.474MeVの陽電子を一崩壊あたり15%の割合で放出して、残りは電子捕獲によりいずれもFe-58の励起状態に崩壊し、9.4ピコ秒で8.11MeVの $\gamma$ 線を放出して安定なFe-58となる。また、Zn-65は1.14%の分岐比で陽電子崩壊し、Cu65の基底状態に崩壊して、この場合には $\gamma$ 線の同時放射は伴わない。

【0094】こうした核種は、被検体7の内面及び汚染した構造材にあっては、表面から陽電子を放出して外部から陽電子を照射したのと同様に、被検体7の内部の電子と結合して消滅 $\gamma$ 線を放出し、陽電子の寿命あるいは消滅 $\gamma$ 線のエネルギー分解能の変化により内部の欠陥の量の診断が可能である。このように、被検体の放射エネルギーが高い場合については、陽電子線源1を外部から被検体7に当てる代りに、このような自発性の消滅 $\gamma$ 線を用いて材料の劣化診断を行おうとするものである。

【0095】この際に、 $\gamma$ 線を放出する核種のうちで最も放射エネルギーの大きいと予想されるのはCo-60であり、外部から陽電子を照射する方法と同様に、エネルギー測定法や寿命測定法のいずれについても、上記課題(2)及び課題(3)に示すような妨害効果が避けられない。



【0096】このため、Co-58における陽電子と同時に放出される8.11MeV $\gamma$ 線を消滅 $\gamma$ 線の測定用とは別の検出器で測定し、上記エネルギー測定法における(a)に示す同時計数、あるいは時間測定法による(e)に示す同時計数によるバックグラウンドの影響除去が有効である。

【0097】本発明の一実施例につき図面を参照して説明する。なお、上記した従来技術と同じ構成部分には同一符号を付して詳細な説明を省略する。第1実施例は、図1の構成図に示すように検査装置はエネルギー計測法の10  
場合である。検出装置におけるGe検出器13は、被検体7中に含まれる放射性物質からの $\gamma$ 線によるGe検出器13の飽和、あるいは高計数率によるバイルアップによる光電ピーク部のエネルギー分解能の悪化を防止するため、遮蔽体付きコリメータ16あるいは図示しない遮蔽が設けられている。

【0098】また、陽電子線源1は遮蔽体付きコリメータ16の開口部に近接しては設置されていて、Ge検出器13には出力信号を増幅する前置増幅器9、及び線形増幅器10とマルチチャネルアナライザ12が接続されて構成して10  
いる。

【0099】上記構成による作用は、前記遮蔽体付きコリメータ16を構成する物質中で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線は、遮蔽体付きコリメータ16中で吸収されてGe検出器13には到達しない。陽電子線源1から放出された陽電子は、被検体7内で運動エネルギーを失い、被検体7の電子と結合して互いに反対方向に放出される0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aを放出して消滅する。

【0100】Ge検出器13からの信号は、前置増幅器9及び線形増幅器10を経てマルチチャネルアナライザ12によりデジタル化され、このマルチチャネルアナライザ12内のメモリに $\gamma$ 線のエネルギースペクトルの形で蓄積される。また、当該データは図示しない計算機に取り込まれて、Sパラメータに代表される消滅 $\gamma$ 線の光電ピークの形状パラメータが計算される。したがって、被検体7からGe検出器13に入力する0.511MeV $\gamma$ 線は、遮蔽体付きコリメータ16中で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線と重ならず高いS/N比が得られる。

【0101】第2実施例は図2の構成図に示すように、検査装置は遮蔽体付きコリメータ16内に設置したGe検出器13の前面で、被検体7に近接して置いた陽電子線源1と被検体7の間に薄い透過型検出器17を設置して検出装置が構成されている。また、Ge検出器13には前置増幅器9a及び線形増幅器10aと、遅延増幅器18が、透過型検出器17には前置増幅器9b及び線形増幅器10bと、シングルチャネル波高弁別器11及びゲートアンドディレイジェネレータ19が接続されている。

【0102】さらに、前記遅延増幅器18とゲートアンドディレイジェネレータ19は、線形増幅器10とマルチチャネルアナライザ12に接続されて構成している。なお、前

記陽電子線源1としてはNa-22の他にGe-68などが用いられ、透過型検出器17としてはライトガイドで囲まれた薄いプラスチックシンチレーション検出器、透過型Si半導体検出器などの使用が可能である。また、被検体7の放射性汚染物質から放出される $\gamma$ 線の影響をでき得る限り避けるためには、透過型検出器17の厚みはでき得る限り薄いことが望ましい。

【0103】上記構成による作用は、陽電子線源1から放出された陽電子は、エネルギーの一部を透過型検出器17内で損失させられて、電気的あるいは光信号として取出される。また、一部のエネルギーを損失した陽電子は、被検体7内で運動エネルギーを失い、被検体7の電子と結合して互いに反対方向に放出される0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aを放出して消滅する。

【0104】これにより、透過型検出器17からの信号は前置増幅器9b、線形増幅器10b、シングルチャネル波高弁別器11により増幅と整形後に、ゲートアンドディレイジェネレータ19により適当に遅延して、矩形パルスに整形後に線形ゲート8のゲート信号に入力される。

【0105】一方、被検体7中で発生する0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aは、陽電子線源1及び透過型検出器17の後方に設置されたGe検出器13により電気信号に変換され、前置増幅器9a、線形増幅器10aと遅延増幅器18により一定時間遅延後に線形ゲート8の線形入力となる。また、透過型検出器17と同時に入射したもののみ、マルチチャネルアナライザ12の入力となりパルス波高に比例したデジタル信号に変換されて、 $\gamma$ 線スペクトルの形でマルチチャネルアナライザ12内のメモリに蓄積される。

【0106】このスペクトルは、陽電子の透過に伴う信号と同時計数させたもので偶発的な事象を除き、陽電子の被検体7内での消滅に伴う信号のみの寄与分しか含まれていない。また、 $\gamma$ 線スペクトルは、上記した図24に示す0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピークの中心部Aと、周辺部B<sub>1</sub>+B<sub>2</sub>の計数率比であるSパラメータを算出し、材質劣化指標とされる。

【0107】第3実施例は図3の構成図に示すように、検査装置において検出装置は前記図2に示す第2実施例と同様の構成であるが、遮蔽体付きコリメータ16内には $\gamma$ 線用検出器3が設置され、この $\gamma$ 線用検出器3の前面で被検体7との間には、電子線源1と薄い透過型検出器17を設置している。また、 $\gamma$ 線用検出器3には前置増幅器9aとタイミングディスクリ4aが接続され、前置増幅器9aは線形増幅器10aとシングルチャネル波高弁別器11aを介してマルチチャネルアナライザ12と接続した線形ゲート8に接続している。

【0108】一方、透過型検出器17には前置増幅器9bとタイミングディスクリ4bが接続されていて、前置増幅器9bは線形増幅器10bとシングルチャネル波高弁別器11bを介して前記線形ゲート8に接続している。またタイミングディスクリ4bは、ディレイ5を介して前記



タイミングディスクリ4aと共に時間波高変換器6に接続され、この時間波高変換器6は前記線形ゲート8に接続して構成されている。

【0109】上記構成による作用としては、電子線源1より被検体7に到達する陽電子のエネルギーの一部を透過型検出器17内で損失させて、電気的あるいは光信号として取出す。この信号と陽電子線源1の後方に設置された $\gamma$ 線用検出器3により測定された、被検体7内電子と陽電子と間の消滅反応の結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線2aに相当する信号との間の時間差から、被検体7の材質劣化を判定する。

【0110】ここで陽電子が発生して消滅するまでの時間差としては数100ナノ秒程度で、透過型検出器17としてはプラスチックシンチレーション検出器などが最適であり、このプラスチックシンチレーション検出器の場合には、時間信号は高速が要求される。

【0111】このため、プラスチックシンチレータに接続された光電子増倍管のダイノード出力を直接タイミングディスクリ4bに入力し、短い幅の矩形信号に変換してからディレイ5により一定時間遅延し、時間波高変換器6のスタート信号入力としている。

【0112】一方、陽電子線源1及び透過型検出器17の後方に設置された $\gamma$ 線用検出器3には信号の高速性が要求されるところから、プラスチックシンチレーション検出器などの使用が望ましい。当該 $\gamma$ 線用検出器3としてシンチレーション検出器を用いる場合には、前記透過型検出器17と同様に光電子増倍管のダイノード出力を直接タイミングディスクリ4aに入力し、短い幅の矩形信号に変換して時間波高変換器6のストップ信号として入力する。

【0113】最後に前記スタート信号とストップ信号との時間差に比例した出力波高に変換され、線形ゲート8の線形入力信号とする。一方、 $\gamma$ 線用検出器3及び透過型検出器17のそれぞれのアノード信号は、前記前置増幅器9a、9b及び線形増幅器10a、10bで整形増幅後に、シングルチャネル波高分析器11a、11bにより一定波高ウィンドウ領域の信号のみが選別される。

【0114】陽電子線源1としてNa-22を用いた場合には、 $\beta^+$ 崩壊後のK-22励起状態により生じる1.275MeV $\gamma$ 線のピークエネルギーに相当するウィンドウ領域のみに限った方が信号のS/N比が改善される。なお、シングルチャネル波高分析器11a、11bからの信号は、ディレイ5により遅延時間調整後に線形ゲート8のゲート入力とされて、時間波高変換器6からの信号を含む3者の信号が、同時に入力した場合のみ出力信号が発生する。

【0115】これによる線形ゲート8からの信号は、マルチチャネルアナライザ12の入力として、図4の分布特性図に示すような陽電子の寿命分布が得られ、この平均寿命の変化として被検体7の材質劣化度が判定できる。

【0116】第4実施例は図5の構成図に示すように、

検査装置は遮蔽体付きコリメータ16内に設置したGe検出器13と、別の遮蔽体付きコリメータ16a内に設置した陽電子線源1及び透過型検出器17とを、互に視野に入らず、かつ被検体7に対峙して配置して検出装置が構成されている。

【0117】またGe検出器13には、前置増幅器9a及び線形増幅器10aと遅延増幅器18が接続され、透過型検出器17には前置増幅器9b及び線形増幅器10bと、シングルチャネル波高弁別器11及びゲートアンドディレイジェネレータ19が接続されている。さらに、前記遅延増幅器18とゲートアンドディレイジェネレータ19は、線形増幅器10とマルチチャネルアナライザ12に接続されて構成している。

【0118】本第4実施例は上記第2実施例及び第3実施例に比べて、陽電子が遮蔽付きコリメータ16や、陽電子線源1を構成する材質自体との反応で生ずる消滅 $\gamma$ 線、及び陽電子線源1自体から発生する $\gamma$ 線の妨害が無いため、被検体7から発生する消滅 $\gamma$ 線の測定に際してS/N比が大幅に改善できる。

【0119】第5実施例は図6の構成図に示すように、検出装置は上記第4実施例の図5と同様に、それぞれ遮蔽体付きコリメータ16、16a内に設置された $\gamma$ 線用検出器3と陽電子線源1及び透過型検出器17で、互いの視野に入らないように配置している。また、計測信号処理系については、上記第3実施例の図3と同様に構成されている。

【0120】上記構成による作用としては、上記第3実施例に比べて、陽電子が遮蔽体付きコリメータ16及び陽電子線源1を構成する材質自体との反応で生ずる消滅 $\gamma$ 線と、陽電子線源1自体から発生する $\gamma$ 線の妨害が無いため、被検体7から発生する消滅 $\gamma$ 線の測定において、S/N比を大幅に向上することができる。

【0121】第6実施例は図7の構成図に示すように検出装置に係り、上記第2実施例乃至第5実施例においては、陽電子線源1と透過型検出器17を離して設置した場合を示している。本第6実施例は、被検体7に接触あるいは近接させたシンチレータ薄板20上に陽電子線源1を、図7(a)に示すように被検体7面と反対面に沈着、あるいは図7(b)に示すようにシンチレータ薄板20内に埋込んだもので、シンチレータ薄板20の両側にライトガイド21を設け、さらに光電子増倍管22と結合して構成する。

【0122】なお、シンチレータ薄板20は、被検体7から発生する $\gamma$ 線による信号のバイルアップや、偶発同時計数の影響をできる限り防止する観点からでき得る限り薄いことが望ましい。このシンチレータの種類としては、出力信号の時間的特性や加工性、及び強度などの観点からプラスチックシンチレーション検出器、あるいはガラスシンチレーション検出器などが用いられる。また、シンチレータ薄板20はアクリルなどより加工される

25

ライドガイド21により側面を覆われて、光電子増倍管22に光学的に結合している。

【0123】上記構成によれば、陽電子が被検体7に到達する間に、陽電子のエネルギーの一部をシンチレータ薄板20内で損失させて、同損失エネルギーに該当するシンチレータ薄板20からの光信号を、ライドガイド21を通じ、あるいは直接的に光信号として光電子増倍管22にて検出する。

【0124】第7実施例は図8の構成図で(a)の側面図及び(b)の平面図に示すように検出装置に係り、陽電子線源1を被検体7に接触あるいは近接させたシンチレータ薄板20、及びこのシンチレータ薄板20に比較して厚く、かつシンチレータ光に対して透明であるライドガイド21を後方ライドガイド21aにより層状に挟み込む。さらに、透明なライドガイド21を介して光電子増倍管22に光学的に結合した構成としている。

【0125】上記構成による作用は、陽電子が被検体7に到達する間に、陽電子のエネルギーの一部をシンチレータ薄板20内で損失させて、同損失エネルギーに該当するシンチレータ薄板20からの光信号をライドガイド21、21aを通じ、あるいは直接的に光信号として光電子増倍管22により取得する。

【0126】この第7実施例では、陽電子線源1の後方に比較的厚い板状の後方ライドガイド21aを設置してあるので、上記第6実施例に比べて、集光効率を大幅に高めることが可能であり、信号のS/N比が向上すると共に、物理的な強度、集光効率を考慮することなくシンチレータ薄板20を薄くできる。

【0127】したがって、 $\gamma$ 線によるバイルアップまたは偶発同時計数の影響を低減できて、測定系のダイナミックレンジの改善が図れ、より高い放射能を有する被検体7についても測定が可能となる。また、被検体7で発生した消滅 $\gamma$ 線に対しては、シンチレータ薄板20、あるいはシンチレータ薄板20の後部に置かれた後方ライドガイド21aによってはほとんど減衰しないため、後方の光電子増倍管22に及ぼす影響は少ない。

【0128】また、副次的には被検体7の反対面に放出される陽電子を、後方ライドガイド21a中で後方散乱させて、シンチレータ薄板20を通過して前方方向に向かい被検体7中で消滅する陽電子量を増やす効果もあり、その結果として陽電子線源1の放射能を増やした形となり測定時間を短縮することができる。

【0129】第8実施例は図9の構成図に示すように、表面が放射性物質に汚染している被検体7に用いる場合の対策を施した検査装置で、この検査装置における検出装置の構成は、上記第2実施例の図2に示すものとほぼ同様であるが、遮蔽体付きコリメータ16の開口部をフィルタとして $\beta$ 線吸収体23により封止して構成している。なお、計測信号処理系についても、上記第2実施例の図2に示すものと同様に構成されている。

26

【0130】上記構成による作用は、透過型検出器17を表面が放射性物質に汚染している被検体7に用いる場合の問題の解決方法であり、原子炉施設においては放射化あるいは汚染物との接触などにより表面及び内面が放射能により汚染されている。

【0131】汚染物中に含まれるCo-60 などからの $\beta$ 線は、被検体7近傍に置かれた透過型検出器17に入射して、陽電子の信号とバイルアップに伴う透過型検出器17の計数率特性を悪化させ、偶発同時計数による寿命測定法における精度の悪化、あるいはエネルギー測定法における偶発同時計数によるバックグラウンドの増加といった悪影響を及ぼす。

【0132】しかしながら原子炉施設の場合には、主要な $\beta$ 線放出核種はCo-60であり、このCo-60の崩壊に伴って放出される $\beta$ 線の最大エネルギーは0.3MeVである。したがって、陽電子線源1の前面に0.3MeVを完全に遮蔽し得る $\beta$ 線吸収体23を設置すれば、陽電子線源1から被検体7の表面に到達する陽電子の数を余り減らすことなく、前段に置かれた同時計数用の透過型検出器17に入射する表面汚染からの $\beta$ 線による計数寄与を減らすことができる。

【0133】なお、Co-60から放出される $\beta$ 線を完全に除去するためには、アルミニウムの場合で最小80mg/cm<sup>2</sup>の厚さが必要である。本第8実施例においては、上記第1実施例乃至第7実施例に、最大エネルギー0.3MeV以上の陽電子を放出する陽電子線源1を用い、被検体7及び透過型検出器17の間に80mg/cm<sup>2</sup>以下の $\beta$ 線吸収体23を置くことで適用できる。

【0134】ここで陽電子線源1としては、Ge-68 (Ga-68)、最大エネルギー1.9MeV、Na-22、最大エネルギー0.54MeVなどの使用が可能である。なお、陽電子線源1からの陽電子自体の当該 $\beta$ 線吸収体23の設置に伴う吸収率は、高々数10%に過ぎないため測定には殆んど影響は無い。

【0135】第9実施例は図10の構成図に示すように、陽電子線源1を用いた非破壊検査を水中で実施する場合の対策に係る。これは、被検体7の放射能が極めて高い場合には、検査作業を水中で行う必要が生じる。なお、水中における陽電子の飛程は1mm以下であることから、水中では陽電子線源1を被検体7とほぼ接触させる必要があり、陽電子線源1の汚染、あるいは破損に注意する必要がある。

【0136】図10に示すように検出装置としては、内部にGe検出器13を設置し、開口側先端に陽電子線源1を配置した遮蔽体付きコリメータ16で、この開口を水密蓋24で封止すると共に、遮蔽体付きコリメータ16の被検体7と対峙する部分に、陽電子線源1及び被検体7を覆って空間を確保する空洞形成用覆い25を設けた構成としている。なお、計測信号処理系については、上記第2実施例の図2に示すものと同様に構成されている。

27

【0137】上記構成による作用としては、空洞形成用覆い25には加圧ガス注入孔26が設けてあり、さらに空洞形成用覆い25は遮蔽体付きコリメータ16及び被検体7に密接させて、加圧ガス注入孔26から圧搾空気27を供給することにより、陽電子線源1及び被検体7間に空洞とエアカーテンを形成させて、陽電子線源1と被検体7との空間による陽電子の飛行距離を維持する。

【0138】第10実施例はエネルギー測定法に係るもので、検査装置は図11の構成図に示すように、検出装置として内部にGe検出器13を設置し、開口側先端に陽電子線源1を配置した遮蔽体付きコリメータ16が、被検体7と陽電子線源1間に陽電子線源校正用フィルタ28と、校正用フィルタ駆動機構29を設けている。なお、計測信号処理系については、上記第2実施例の図2に示すものと同様に構成している。

【0139】また、被検体7と陽電子線源1間に設ける陽電子線源校正用フィルタ28は、陽電子の最大飛行以上の厚みを有する板で、校正用フィルタ駆動機構29により遠隔で自動的に矢印29aの方向に移動して陽電子線源1を遮蔽及び開放させる。

【0140】陽電子線源1から放出される陽電子は、すべて陽電子線源校正用フィルタ28内の電子と反応して、0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を発生するが、この陽電子線源校正用フィルタ28の材質としては、アルミニウムあるいは被検体7と同一材質の試料を焼鈍し、十分欠陥などを取り除いたものを使用する。なお、アルミニウムは内部の欠陥などの影響が少なく欠陥を持たない被検体7のリファレンス用として最適である。

【0141】上記構成による作用としては、陽電子線源校正用フィルタ28を設置状態、及び非設置状態に切替えて被検体7に対する測定を行い、それぞれにおける $\gamma$ 線スペクトルをGe検出器3で得て、図示しない計算機により消滅 $\gamma$ 線の光電ピークを対象として、Sパラメータをそれぞれ計算する。Sパラメータを同吸収物質の設置状態、及び被設置状態で上記式(1)からそれぞれ計算し、これを $S_1$ 、 $S_2$ とすれば、 $(S_1 - S_2)$ を新たな指標として被検体7の材質状態の判定が行える。

【0142】第11実施例は寿命測定法に係るもので、検査装置は図12の構成図に示すように、検出装置として内部に $\gamma$ 線用検出器3を設置し、開口部に陽電子線源1と透過型検出器17を配置した遮蔽体付きコリメータ16と、この遮蔽体付きコリメータ16と被検体7との間に陽電子線源校正用フィルタ28と、校正用フィルタ駆動機構29を設けている。なお、計測信号処理系については、上記第3実施例の図3に示すものと同様に構成されている。

【0143】上記構成による作用は、上記第10実施例におけるSパラメータ計算の代りに陽電子の寿命の測定を、校正用フィルタ駆動機構29により陽電子線源校正用フィルタ28を矢印29aの方向に自動的に移動して、それぞれの状態で実施し、寿命時間差を新たな指標として被

28

検体7の材質状態の判定を行う。

【0144】第12実施例は図13の構成図に示すように、検査装置に上記第10実施例におけるエネルギー測定法においては、環境要件や計数率の変動などに伴う検出器固有のエネルギー分解能測定を実際の測定の都度行う必要性があり、0.511MeV近傍に放出 $\gamma$ 線のエネルギーを有する $\gamma$ 線放出核種を標準線源による現場での校正を可能とする機能を付与したものである。

【0145】内部にGe検出器13を設置した遮蔽体付きコリメータ16は、開口側で被検体7に対峙して陽電子線源1を配置し、さらに、陽電子線源1と被検体7の間に吸収体用駆動機構32により矢印32aで示す方向に自動的に移動可能とした $\beta$ 線吸収体23を設置する。

【0146】また、前記Ge検出器13と $\beta$ 線吸収体23の間でGe検出器13に近接して校正用線源30を設けて、この校正用線源30は校正用線源駆動装置31により矢印31a方向に移動可能とし、校正用線源30の正面で校正測定が可能か、遮蔽体付きコリメータ16内の凹部に設けた収納部31bのいずれかに配置される。なお、計測信号処理系については、上記第1実施例の図1に示すものと同様に構成されている。

【0147】上記構成による作用としては、 $\beta$ 線吸収体23を吸収体用駆動機構32により移動することにより、陽電子線源1により被検体7に対して、開状態にして陽電子照射状態に、また閉状態として非照射状態とすることができる。校正測定時には、陽電子線源1の前面を $\beta$ 線吸収体23により閉状態として、被検体7からの放射線の影響化でGe検出器3による消滅 $\gamma$ 線の $\gamma$ 線スペクトルの測定が行われる。

【0148】なお、使用可能な核種としてはRu-106 (0.51186MeV)、Ru-103 (0.49708MeV)、Be-7 (0.477605MeV) などがある。また、測定時には陽電子線源1の前面の $\beta$ 線吸収体23は開状態として、被検体7は陽電子線源1から陽電子照射下で材料中の消滅 $\gamma$ 線の $\gamma$ 線スペクトルの測定を行う。

【0149】この状態で得られた $\gamma$ 線スペクトルから、図示しない計算機により消滅 $\gamma$ 線の光電ピークを対象として、Sパラメータをそれぞれ計算する。このSパラメータ計算値を $\beta$ 線吸収体23の配置状態、及び非配置状態を $S_1$ 、 $S_2$ とすれば $(S_2 - S_1)$ を新たな指標として被検体7の材質状態の判定が行える。

【0150】第13実施例は図14の構成図に示すように、検査装置における検出装置は、消滅 $\gamma$ 線用として第1の $\gamma$ 線用検出器33が、遮蔽体付コリメータ16内で被検体7を視野に納めているが、遮蔽体付コリメータ16開口側の先端に配置された陽電子線源1が、直接照射しない位置に設置されている。

【0151】また、同時放出 $\gamma$ 線用である第2の $\gamma$ 線用検出器34は、前記第1の $\gamma$ 線用検出器33の遮蔽体付コリメータ16の軸と斜めに交差した、別の遮蔽体付コリメー

タ16a内に設置されて陽電子線源1を視野に納めている。しかし、被検体7は直接視野に納めることがないような形状の遮蔽体付コリメータ16aにより構成されている。

【0152】したがって、陽電子線源1は第2の $\gamma$ 線用検出器34を視野に納めるが、第1の $\gamma$ 線用検出器33には直接照射しないように配置され、さらに陽電子線源1からの陽電子による遮蔽体付コリメータ16の照射部位を、第1の $\gamma$ 線用検出器33が視野に納めないように配置してある。

【0153】第1の $\gamma$ 線用検出器33及び第2の $\gamma$ 線用検出器34としては、プラスチックシンチレーション検出器が時間的応答性の速さから有効であり、本第13実施例も同検出器を用いた場合を示している。なお、計測信号処理系については、上記第3実施例の図3に示すものと同様に構成されている。

【0154】上記構成による作用は、陽電子線源1としてはNa-22が使用可能であり、同時放出 $\gamma$ 線用である第2の $\gamma$ 線用検出器34により陽電子線源1からの陽電子崩壊に伴う1.275MeV放出 $\gamma$ 線に対応した信号が、タイミ

ングディスクリ4bを経由して時間波高変換器6のスタート信号入力となる。

【0155】この第2の $\gamma$ 線用検出器34は、被検体7を直接視野に納めることはないで、入射する $\gamma$ 線は陽電子線源1からの陽電子崩壊に伴う1.275MeV放出 $\gamma$ 線、及び陽電子の周辺遮蔽体から発生する0.511MeV $\gamma$ 線のみとなる。一方、陽電子の被検体7上の照射領域を眺めるように配置した、消滅 $\gamma$ 線用である第1の $\gamma$ 線用検出器33では、0.511MeV消滅 $\gamma$ 線及び被検体7中に含まれる放射性核種から放出される $\gamma$ 線が含まれる。

【0156】両者に対応した信号がそれぞれのタイミングディスクリ4a、4bを経由して時間波高変換器6のストップ及びスタート信号入力となることから、基本的に両者の同期するのは偶発同時計数を除き、陽電子崩壊に伴う1.275MeV放出 $\gamma$ 線、及び陽電子の被検体7中で発生する0.511MeV $\gamma$ 線のみである。

【0157】このことから、両者の差は陽電子の被検体7中の寿命となる。なお、本第13実施例では従来の寿命測定法の配置と異なり、被検体7中に含まれる可能性の高い核種である2本の $\gamma$ 線を放出するCo-60について、上記図22で示した従来例の配置では、一方の $\gamma$ 線用検出器3bが被検体7を視野に含まないことから、Co-60の $\gamma$ 線による同時計数の可能性を従来に比べて減らすことができる。

【0158】第14実施例は図15の構成図に示すように、エネルギー測定法に対する発明で、検査装置における検出装置は、上記第13実施例と同じ構造であるが、遮蔽体付コリメータ16内には消滅 $\gamma$ 線用である $\gamma$ 線用検出器13が、また、遮蔽体付コリメータ16内には同時放出 $\gamma$ 線用として、例えばNaIシンチレーション検出器の $\gamma$ 線用検

出器3が設置されて構成している。なお、計測信号処理系については、上記第2実施例の図2に示すものと同様に構成されている。

【0159】上記構成による作用は、陽電子線源1から放出される陽電子は被検体7内で運動エネルギーを失い、被検体7の電子と結合し、互いに反対方向に放出される0.511MeV消滅 $\gamma$ 線を放出して消滅する。この0.511MeV消滅 $\gamma$ 線はGe検出器13により電気信号に変換される。このGe検出器13からの信号は、前置増幅器9aと線形増幅器10a、遅延増幅器18により一定時間遅延後に線形ゲート8に入力される。

【0160】一方、同時に発生する $\gamma$ 線は $\gamma$ 線用検出器3で電気信号に変換され、前置増幅器9b、線形増幅器10bにより増幅と整形後に、シングルチャネル波高弁別器11により放出 $\gamma$ 線のエネルギーに相当する狭いエネルギー領域に相当するもののみ選別され、ゲートアンドジェネレータ19による適当な遅延及びアナログデジタル変換の同時計数入力に適合した矩形パルスに整形後に線形ゲート8のゲート信号に入力される。

【0161】線形ゲート8では、Ge検出器13からの信号 $\gamma$ 線用検出器3と同時に入射して信号を発したもののみ、マルチチャネルアナライザ12の入力となりパルス波高に比例したデジタル信号に変換されて、マルチチャネルアナライザ12内のメモリに $\gamma$ 線スペクトルの形で蓄積される。

【0162】同スペクトルは、陽電子の発生時にほぼ同時に発生する $\gamma$ 線と同時計数させたもので、偶発的な事象を除いて陽電子の被検体7内での消滅に伴う信号のみの寄与分しか含まれていない。上記 $\gamma$ 線スペクトルから、上記図24(b)に示す0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピークの中心部A、及び周辺部B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>の計数率比であるSパラメータを、上記式(1)により算出して材質劣化指標とする。

【0163】第15実施例は、被検体7自体が中性子により汚染、もしくは放射化されている場合に陽電子線源1を必要とせずに測定を行うもので、たとえば、被検体7の表面あるいは被検体7内面中に含まれるZn-65、Co-58などの陽電子放出核種より放出される陽電子と、被検体7内電子及び陽電子との間の消滅反応の結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを得るものである。

【0164】図16の構成図に示すように検査装置は、前方に検出器の窒息防止のために開口した遮蔽体付コリメータ16内にGe検出器13を設置して構成され検出装置と、このGe検出器13からの信号を増幅する前置増幅器9、及び波形整形する線形増幅器10と、この出力をパルス波高に比例したデジタル信号に変換するマルチチャネルアナライザ12による計測信号処理系とで構成している。

【0165】上記構成による作用は、被検体7自体にお

ける陽電子放出核種より放出される陽電子と、被検体7内電子及び陽電子との間の消滅反応の結果から生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルをGe検出器13により検出して、その光電ピーク形状から被検体7の材質劣化を判定する。

【0166】マルチチャンネルアナライザ12内のメモリに $\gamma$ 線スペクトルの形で蓄積されたスペクトルは、陽電子の被検体7内での消滅に伴う信号のみの寄与分を含み、上記図24に示す0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピークの中心部A及び、周辺部B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>の計数率比であるSパラメータを算出することで、材質劣化の指標とされる。

【0167】第16実施例は図17の構成図に示すように、検査装置は遮蔽体付コリメータ16内に設置した消滅 $\gamma$ 線用である第1の $\gamma$ 線用検出器33と、別の遮蔽体付コリメータ16a内に設置した同時放出 $\gamma$ 線用である第2の $\gamma$ 線用検出器34とを、互いが視野に入らず、かつ被検体7に対峙して配置して検出装置が構成されている。

【0168】また、第1の $\gamma$ 線用検出器33と第2の $\gamma$ 線用検出器34としては、信号の高速性が要求されるところからプラスチックシンチレーション検出器が最適である。なお、計測信号処理系については、上記第3実施例の図3に示すものと同様に構成されている。

【0169】上記構成による作用は、被検体7中にはCo-60などの $\gamma$ 線を放出する核種が含まれているが、このうちCo-58については、陽電子発生と同時に0.811MeV $\gamma$ 線を発生する。このため、同 $\gamma$ 線と被検体7内電子と陽電子との間の消滅反応の結果により生じる0.511MeV消滅 $\gamma$ 線に相当する信号との間の時間差から陽電子寿命の測定をする。

【0170】第17実施例は図18の構成図に示すように、検査装置は遮蔽体付コリメータ16内に設置した主検出器であるGe検出器13と、別の遮蔽体付コリメータ16a内に設置した副検出器としての $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器としてGe検出器13aを設置し、Ge検出器13、13aは互いに視野に入らず、かつ被検体7に対峙して配置して検出装置が構成されている。

【0171】また、 $\gamma$ 線エネルギー測定用検出器としてGe検出器13、13aを用いており、エネルギー分解能の点で最適であるが、NaIシンチレーション検出器などの有機シンチレーション検出器についても使用することができる。なお、計測信号処理系については、上記第2実施例の図2に示すものと同様に構成されている。

【0172】上記構成による作用としては、 $\gamma$ 線エネルギー測定用のGe検出器13、13aでは、被検体7中に含まれたCo-58より放出される0.811MeV $\gamma$ 線の光電ピークを含むエネルギーウィンドウ領域に、シングルチャンネル波高弁別器11を設定する。この信号をGe検出器13aの同時計数ゲート信号とすることにより、Co-58の $\gamma$ 線に付随した陽電子の消滅 $\gamma$ 線のみによる $\gamma$ 線エネルギースペクトルを得ることができる。

【0173】また、Co-60などの同時に複数の $\gamma$ 線を放出する核種については、両者の検出器でエネルギー的な弁別を受けることにより同時計数の対象とならず、陽電子による消滅 $\gamma$ 線測定において、Co-60などの他の $\gamma$ 線核種より放出される $\gamma$ 線の影響を除去した計測が可能となる。

【0174】第18実施例は図19の構成図で示すように、検査装置は遮蔽体付コリメータ16内に設置した消滅 $\gamma$ 線用の第1の検出器33aと、別の遮蔽体付コリメータ16a内に設置した同時放出 $\gamma$ 線用の第2の検出器34aを設置し、この第1の検出器33aと第2の検出器34aは互いに視野に入らず、かつ被検体7に対峙して配置して検出装置が構成されている。なお、この第1の検出器33aと第2の検出器34aは、いずれもCaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器を採用している。

【0175】計測信号処理系について、第1の検出器33aには前置増幅器9aとハイパスフィルタ35aが接続してあり、前置増幅器9aは線形増幅器10a及びシングルチャンネル波高弁別器11aを介して、線形ゲート8に接続されている。また、ハイパスフィルタ35aはタイミングディスクリ4aを介して時間波高変換器6に接続している。

【0176】第2の検出器34aには前置増幅器9bとハイパスフィルタ35bが接続してあり、前置増幅器9bは線形増幅器10b及びシングルチャンネル波高弁別器11bを介して、線形ゲート8に接続する。また、ハイパスフィルタ35bはタイミングディスクリ4b及びディレイ5を介して時間波高変換器6に接続している。さらに、時間波高変換器6の出力は、前記線形ゲート8を経由してマルチチャンネルアナライザ12に接続されて構成している。

【0177】上記構成による作用としては、消滅 $\gamma$ 線用の第1の検出器33a及び、同時放出 $\gamma$ 線用の第2の検出器34aのCaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器における出力信号には、高速成分については、ハイパスフィルタ35a、35bを通してタイミングディスクリ4a、4bの入力となり、時間波高変換器6により時間差に比例した信号に変換される。

【0178】一方、遅延成分については、前置増幅器9a、9b、及び線形増幅器10a、10bを経て、入射 $\gamma$ 線の検出器内部でのエネルギー損失に比例した信号となり、シングルチャンネル波高弁別器11a、11bにより陽電子の放出と同時に放出される $\gamma$ 線の光電ピークエネルギーに相当するウィンドウを設定する。時間差に相当する信号に対し線形ゲート8によりゲートをかけ、時間スペクトルとしてマルチチャンネルアナライザ12にて得られる。

【0179】なお、本第18実施例は、上記した第13実施例あるいは第16実施例と比較して、時間測定に通常用いられるエネルギー分解能の悪いプラスチックシンチレーション検出器の代りに、CaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器



を用いることにより、ゲート信号についてエネルギー的な弁別が可能となり、偶発同時計数による時間スペクトルのゆがみが防止できるので、陽電子の寿命測定精度を高く得られる。

【0180】第19実施例は、消滅 $\gamma$ 線の光電ピーク形状評価方法の具体的手順に係り、上記(d)に示すように $\gamma$ 線スペクトルデータの取得は、上記第1実施例の図1を例にすると、マルチチャンネルアナライザ12に蓄積された消滅 $\gamma$ 線近傍のスペクトルデータは、インターフェイスを介して図示しない計算機へ伝送される。計算機において上記(d)の記載にしたがって解析が行われ、2種類の標準偏差をもつ $\gamma$ 線ピークの和として消滅 $\gamma$ 線スペクトルを近似され、それぞれの $\gamma$ 線ピークの計数比率により材質の劣化度が判定される。

【0181】第20実施例は、構造物材質の健全性の評価に係り、Co-60の濃度は被検体の成分や中性子照射の履歴によっても異なるが、被検体成分及び中性子照射履歴が既知である場合は、図20の放射能濃度特性図に示すように、Co-60放射能濃度と一定の関係として求められる。

【0182】上記の各実施例において、Co-60の放射能濃度とGe検出器などの $\gamma$ 線用検出器の全計数率、またはCo-60の放出 $\gamma$ 線に相当する光電ピーク計数率が求められ、遮蔽体との距離や被検体7の幾何学的形状が既知の場合には、予め求められた換算定数によりCo-60放射能濃度に換算される。

【0183】一方、各実施例により求められた陽電子寿命、あるいは消滅 $\gamma$ 線の形状パラメータ変化を勘案し、図21の陽電子寿命などの相関図に示すように、中性子照射履歴を考慮した中性子照射量との関連を、予めGe検出器の $\gamma$ 線スペクトルよりCo-60の光電ピーク計数率を得て、幾何学的効率を考慮することにより、被検体7中に含まれるCo-60の放射能濃度に換算できる。

【0184】この換算の際にGe検出器あるいはNaIシンチレーション検出器といったエネルギー分解能の良好な $\gamma$ 線用検出器を採用した場合は、消滅 $\gamma$ 線の0.511MeV $\gamma$ 線がCo-60の光電ピーク(1.173MeV及び1.332MeV)が影響を与えることはなく、光電ピークの計数率を求める。あるいは他の核種の混在が無視し得る場合には、計数の際に消滅 $\gamma$ 線を含まないようなエネルギー弁別を行うことにより、Co-60濃度測定が当該非破壊検査の実施と平行して行える。

【0185】しかしながら、プラスチックシンチレーション検出器などのエネルギー分解能の良好でない $\gamma$ 線用検出器を用いた場合には、消滅 $\gamma$ 線の寄与が無視し得ると判断される場合を除き、上記第11実施例の図12に示すように、陽電子線源1を収納あるいは遮蔽する機構を持たせる必要がある。

【0186】さらに同放射能濃度から被検体7の中性子照射積分量を既知のデータにより評価し、エネルギー計測

法については $\gamma$ 線スペクトル上の陽電子消滅に伴う0.511MeV $\gamma$ 線の光電ピーク形状を測定し、また、寿命測定法にては陽電子の寿命を測定して被検体7の各点で両者の情報を取得して図21に示すような相関図からより適切な判定を行うことが可能となる。

【0187】第21実施例は、被検体7の表面が非放射性あるいは放射性のクラッドで汚染している場合には、外部から照射される陽電子の一部は表面のクラッドで消滅し、内面の材質的特性を代表しない場合が有り得る。また、すでに述べたように表面に付着した放射能による測定への影響も大きい。このためには検査に先立って除染を行い表面クラッドを除去する。この除染法としては高圧ジェット洗浄、ブラシ洗浄などの比較的固着性の低い表面汚染に適した物理的除染が望ましい。

【0188】

【発明の効果】以上本発明によれば、特に原子炉施設における各種機器及び構造物に対する金属の健全性が、被検体の放射能汚染あるいは放射化したものであっても、測定員の放射線被曝を低減して、定期点検時などにおいて高精度で安全に検査することができる効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る第1実施例の非破壊検査装置の構成図。

【図2】本発明に係る第2実施例の検査装置の構成図。

【図3】本発明に係る第3実施例の検査装置の構成図。

【図4】本発明に係る第3実施例の陽電子寿命分布特性図。

【図5】本発明に係る第4実施例の検査装置の構成図。

【図6】本発明に係る第5実施例の検査装置の構成図。

【図7】本発明に係る第6実施例の検出装置の構成図で、(a)は陽電子線源沈着の切欠き側面図、(b)は陽電子線源埋込の切欠き側面と平面図。

【図8】本発明に係る第7実施例の検出装置の構成図で、(a)は切欠き側面図、(b)は平面図。

【図9】本発明に係る第8実施例の検査装置の構成図。

【図10】本発明に係る第9実施例の検査装置の構成図。

【図11】本発明に係る第10実施例の検査装置の構成図。

【図12】本発明に係る第11実施例の検査装置の構成図。

【図13】本発明に係る第12実施例の検査装置の構成図。

【図14】本発明に係る第13実施例の検査装置の構成図。

【図15】本発明に係る第14実施例の検査装置の構成図。

【図16】本発明に係る第15実施例の検査装置の構成図。

【図17】本発明に係る第16実施例の検査装置の構成



図。

【図18】本発明に係る第17実施例の検査装置の構成図。

【図19】本発明に係る第18実施例の検査装置の構成図。

【図20】本発明に係る第20実施例の放射能濃度特性図。

【図21】本発明に係る第20実施例の陽電子寿命などの相関図。

【図22】従来の陽電子寿命測定法による検査装置のブロック図。

【図23】従来の $\gamma$ 線エネルギー測定法による検査装置のブロック図。

【図24】従来の陽電子消滅による $\gamma$ 線のエネルギースペクトルの分布特性図で、(a)は殻内電子と欠陥内自由電子分布、(b)は中央部と周辺部分布を示す。

【図25】従来の被検体における焼鈍し温度とSパラメータの特性図。

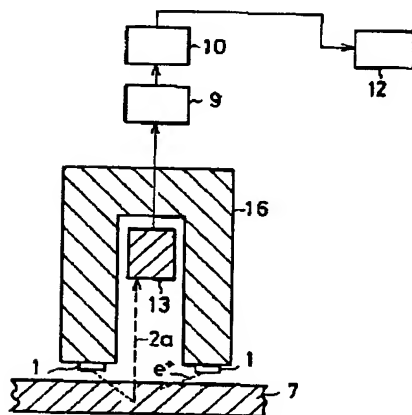
【図26】従来の被検体における焼鈍し温度と硬化度の特性図。

【図27】検出器内における光電ピーク特性図。

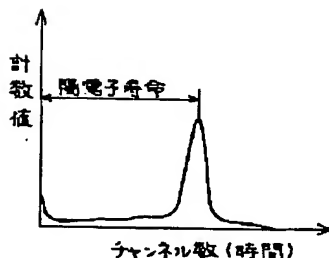
【符号の説明】

1…陽電子線源、2 a…0.511MeV $\gamma$ 線、2 b… $\gamma$ 線、3, 3 a, 3 b… $\gamma$ 線用検出器、4 a, 4 b…タイミングディスクリ、5…ディレイ、6…時間波高変換器、7…被検体、8…線形ゲート、9, 9 a, 9 b…前置増幅器、10, 10 a, 10 b…線形増幅器、11, 11 a, 11 b…シングルチャネル波高弁別器、12…マルチチャネルアナライザ、13, 13 a…Ge検出器、14…殻内電子との消滅成分曲線(点線)、15…自由電子との消滅成分曲線(実線)、16, 16 a…遮蔽体付コリメータ、17…透過型検出器、18…遅延増幅器、19…ゲートアンドディレイジェネレータ、20…シンチレータ薄板、21…ライドガイド、21 a…後方ライトガイド、22…光電子増倍管、23… $\beta$ 線吸収体、24…水密蓋、25…空洞形成用覆い、26…加圧ガス注入孔、27…圧縮空気、28…陽電子線源校正用フィルタ、29…校正用フィルタ駆動機構、29 a…校正用フィルタ移動方向(矢印)、30…校正用線源、31…校正用線源駆動機構、31 a…校正用線源移動方向(矢印)、31 b…校正用線源収納部、32… $\beta$ 線吸収体用駆動機構、32 a… $\beta$ 線吸収体移動方向(矢印)、33, 33 a…第1の $\gamma$ 線用検出器、34, 34 a…第2の $\gamma$ 線用検出器、35 a, 35 b…ハイパスフィルタ、A…中央部面積、B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>…周辺部面積。

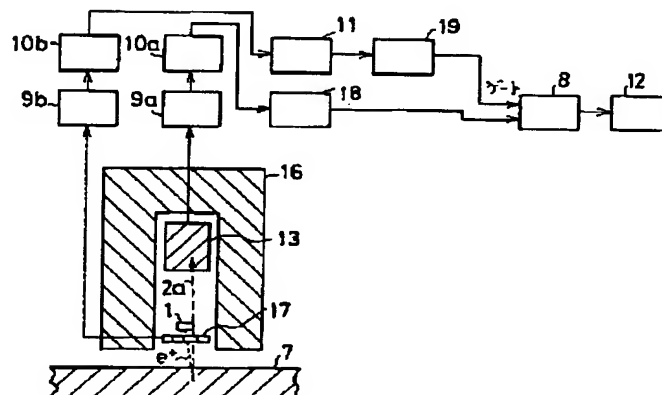
【図1】



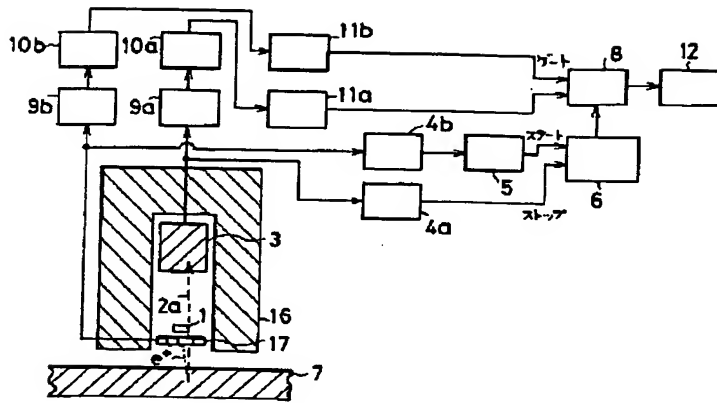
【図4】



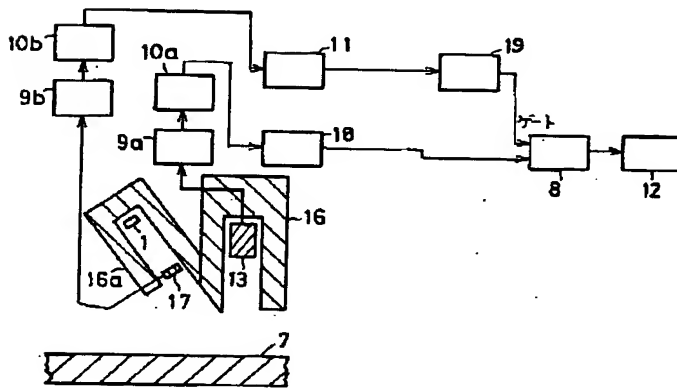
【図2】



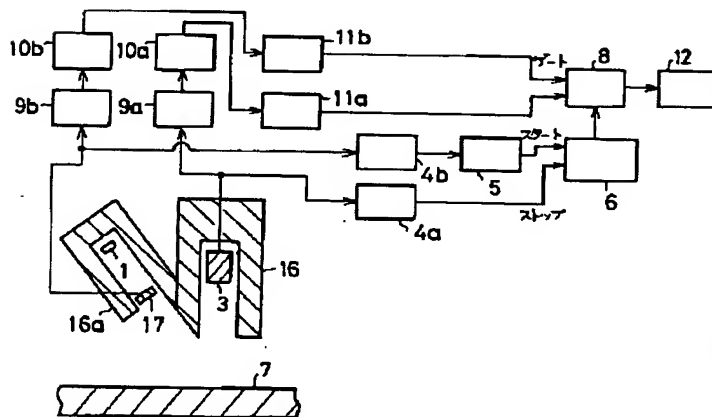
【図3】



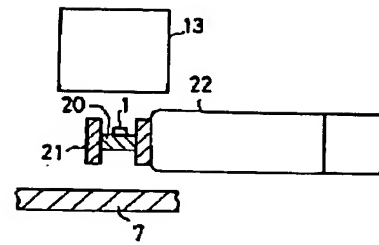
【図5】



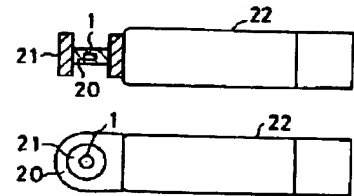
【図6】



【図7】

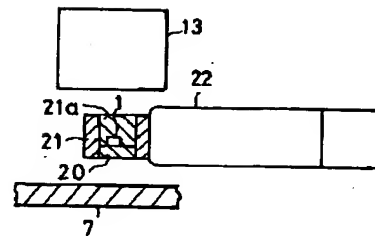


(a)

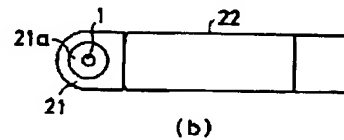


(b)

【図8】

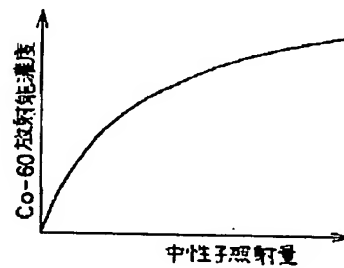


(a)

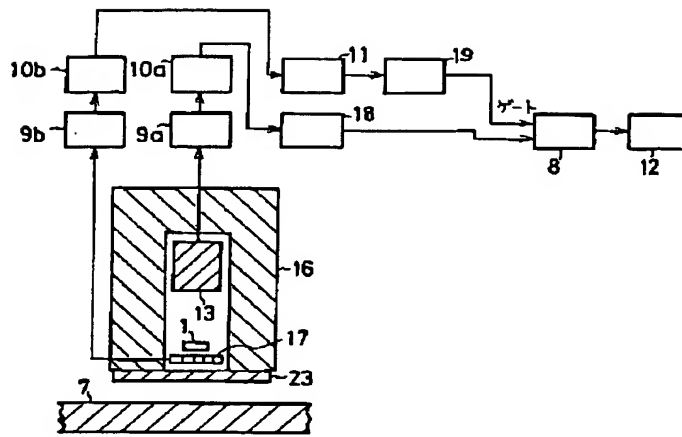


(b)

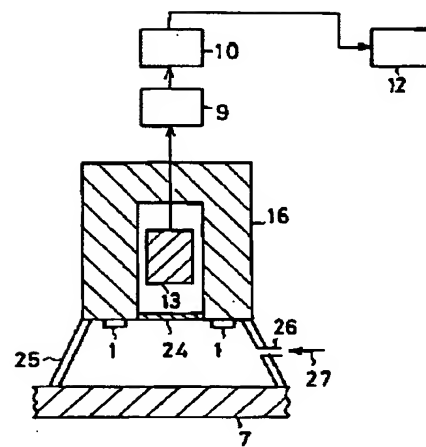
【図20】



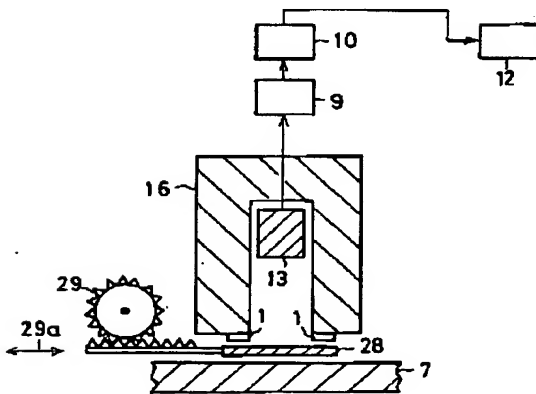
【図9】



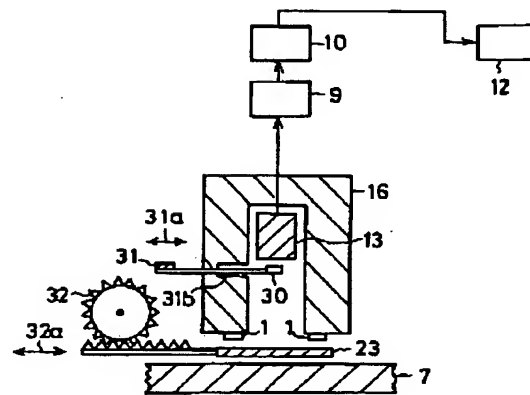
【図10】



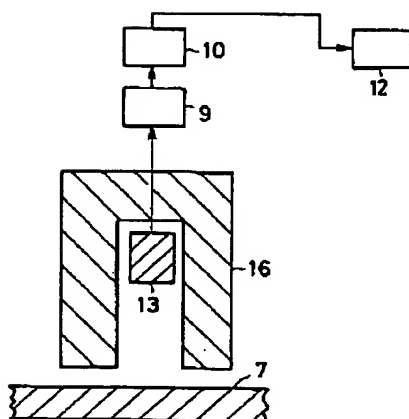
【図11】



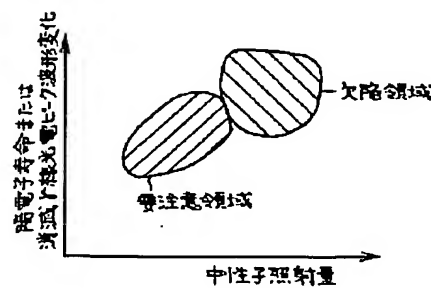
【図13】



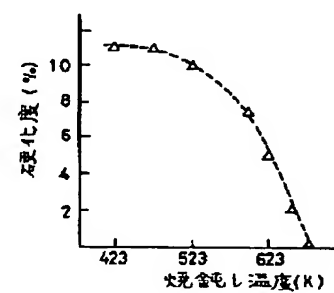
【図16】



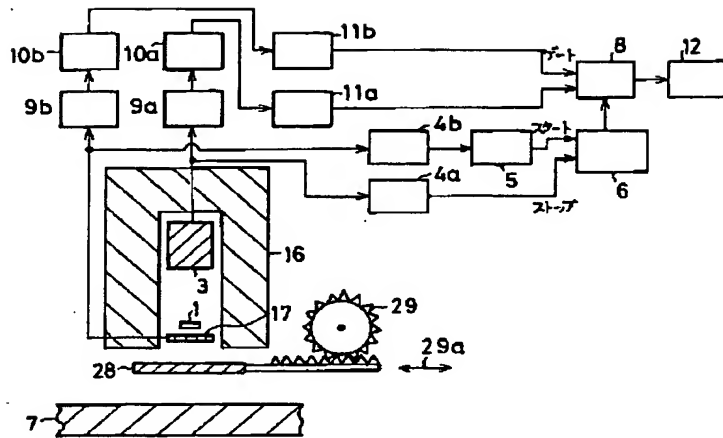
【図21】



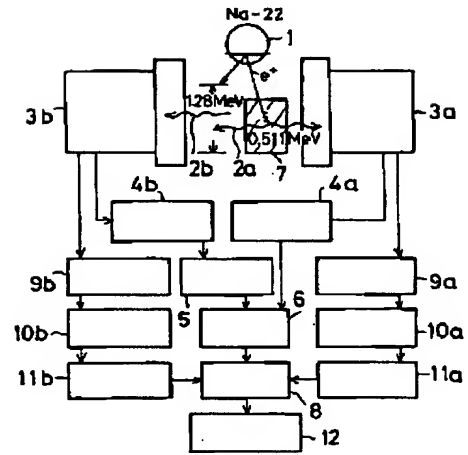
【図26】



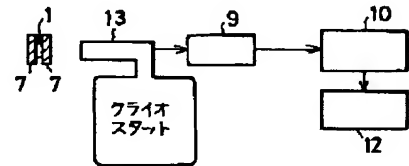
【図 1 2】



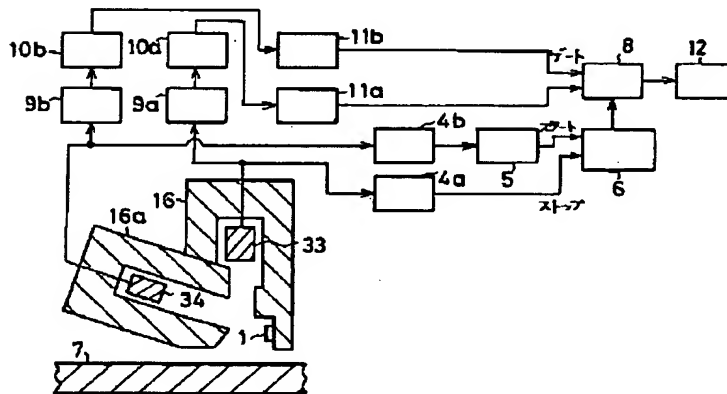
【図 2 2】



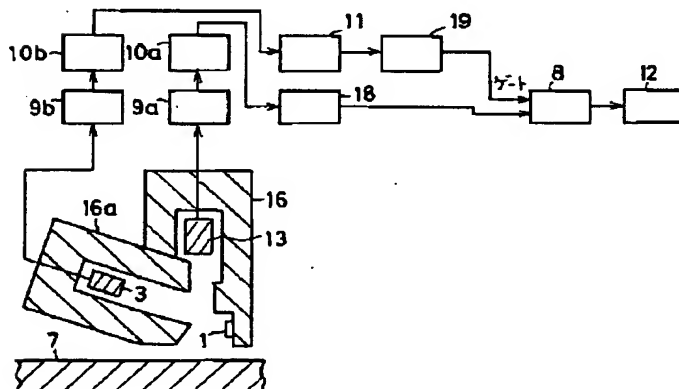
【図 2 3】



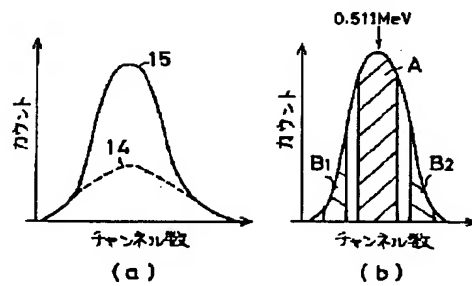
【図 1 4】



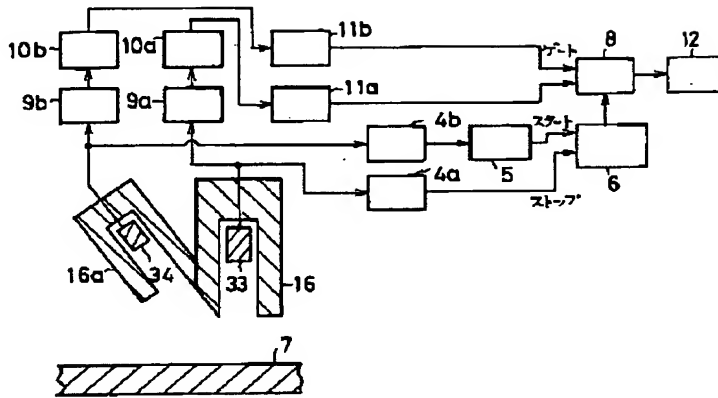
【図 1 5】



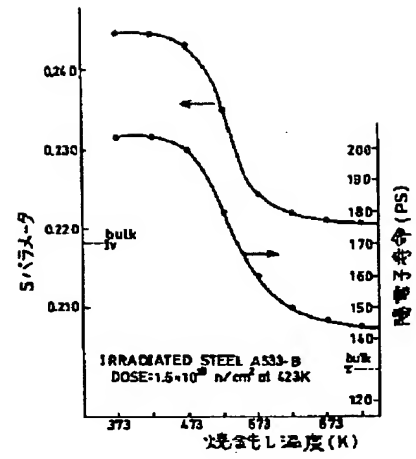
【図 2 4】



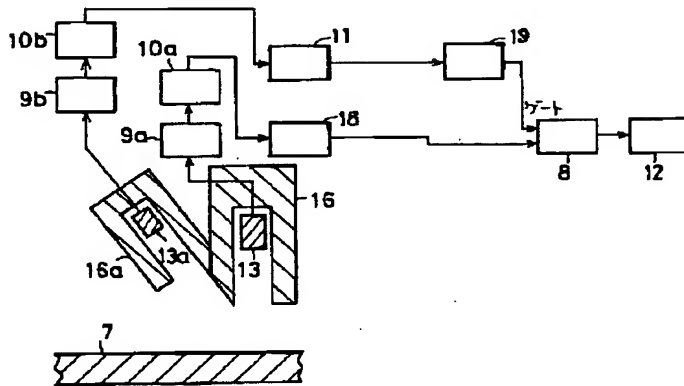
【図17】



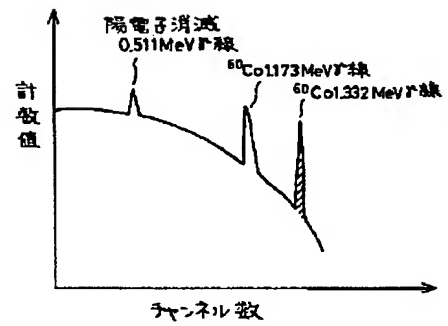
【図25】



【図18】



【図27】



【図19】

